

Physiker im Kreuz- verhör

WALTER CONRAD



Physiker im Kreuz- verhör

Große Experimente und ihre Meister

Mit 100 Bildern

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

Inhaltsverzeichnis

Und sie bewegt sich doch	9
»Abscheu vor der Leere«	27
Schnell wie das Licht	39
An den Quellen des mächtigsten Stromes	51
Draht und Nadel	65
»Die größte Entdeckung des Jahrhunderts«	75
Die zwei Gestalten des Unentbehrlichen	85
Unter dem Regenbogen	97
Unerschöpfliches Teilchen	109
Die Kristalle des Wilhelm Conrad Röntgen	121
Felder, Funken, Wellen	129
Strahlen aus dem Atom	139
Das Experiment, das stets mißglückte	153
Lawine der Kleinsten	163
Quellennachweis der zitierten Veröffentlichungen	185
Namenverzeichnis	187
Sachwortverzeichnis	189

Vorwort

Hören oder lesen wir heute von Physik, denken wir wohl zuerst an gewaltige Kernforschungszentren, an kühne Hypothesen, an Bemühungen großer, internationaler Forscherkollektive, die Rätsel des Plasmas, der Verschmelzung von Atomkernen, der großen Familie der Elementarteilchen oder der Strahlung der Gestirne, ihres Entstehens und ihrer Entwicklung zu ergründen und nutzbar zu machen.

Bestimmt fallen uns auch unmittelbare, alltägliche Auswirkungen der Physik und der mit ihr unlösbar verbundenen Technik auf unser Leben ein. Ohne langes Nachdenken könnte jeder Dutzende Beispiele dafür nennen – vom Mikroskop bis zum Rundfunkempfänger, vom Flugzeug bis zur Schmalfilmkamera, von der Armbanduhr bis zum Riesenteleskop, von der Röntgenuntersuchung bis zum Lichtschalter oder Taschenrechner.

Wir wissen auch: Kein Physiker wartet, ob und bis ihm die Natur einen Blick auf ihre Geheimnisse gewährt. In klug ersonnenen, sorgfältig durchgeführten Experimenten stellt er der Natur Fragen. Die Ergebnisse sind entscheidender Prüfstein für die Richtigkeit jeder Überlegung, für Wert oder Unwert jeder Hypothese oder Theorie.

Seit die Physik Wissenschaft genannt zu werden verdient, begleiten Experimente ihren Weg und markieren seine entscheidenden Punkte. Von diesem Weg, von den Mühen und Erfolgen wollen wir berichten. Dieses Buch soll kein »Physikbuch«, soll weder »Einführung« noch »Grundriß« sein – es ist ein Buch *über* die Physik und ihre Meister. Ihnen wollen wir bei der Arbeit über die Schulter sehen, wollen erfahren, was sie zu ihren Experimenten anregte, mit welchen Hilfsmitteln und Methoden sie die Natur befragten, wie die Antworten lauteten und welche Schlüsse sie daraus zogen. Wir werden von Höhepunkten der Forschung, aber auch von Umwegen und Irrwegen lesen

und Zeugen fruchtbaren Meinungsstreits sein, wie er für jede Wissenschaft unentbehrlich ist.

Oft kommen die Forscher selbst zu Wort; die meisten Abbildungen gehen auf Originalskizzen zurück. Selbstverständlich konnten wir nicht den ganzen Weg der Physik nachzeichnen. Wir mußten uns damit begnügen, an Stellen Umschau zu halten, die sich für die Entwicklung als besonders wichtig erwiesen und Meilensteine im Zeitraum von den Arbeiten Galileis bis zur Freisetzung der Kernenergie sind.

Wir hoffen, vor allem jungen Lesern einen Einblick geben zu können, wie Physiker dazu beitrugen, unsere Kenntnisse und Erkenntnisse zu mehren.

Auch dieses Buch ist ein Experiment. Sein Ergebnis ist nicht an Instrumenten, Diagrammen oder Formeln abzulesen, sondern vor allem an der Kritik der Leser. Sie wünschen, sie erwarten wir.

Verfasser und Verlag

D

Und sie bewegt sich doch

ie Beobachtung, daß Gegenstände zu Boden fallen – gleich, ob emporgeworfen oder lediglich ihrer Unterstützung beraubt – zählt zu den ältesten physikalischen Erfahrungen der Menschheit. Seit mehr als zwei Jahrtausenden versucht man, dieses »Rätsel« zu ergründen.

Die Lösungsversuche führten in die Irre, solange sie auf bloße Spekulation und auf mystisch-religiöse Vorstellungen begründet waren. Noch vor 400 Jahren waren die naturwissenschaftlichen Gesetze des Werfens und Fallens unbekannt. Wer sie zu ergründen suchte und dabei von überkommenen, von der Kirche gutgeheißenen Vorstellungen abwich, galt als Ketzer.

Heute sind die Fallgesetze Bestandteil des elementaren Physikunterrichts. Jeder Schüler lernt, sie anzuwenden.

Nicht nur der zur Erde stürzende Stein unterliegt den Fallgesetzen. Sie bestimmen den Flug des Balls und der Geschosse, den Gang der Pendeluhr, das Bergabrollen der Kugel und des Rades, die Bahn der Rakete und des Erdsatelliten. Sogar bei der Suche nach Bodenschätzen sind sie unentbehrlich.

Florenz, 1636. Im trüben Öllampenlicht schreibt ein Zweiundsiebzjähriger den Titel auf ein vor ihm liegendes Manuskript:

»Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze« – »Gespräche und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige«.

Galileo Galilei (1564 bis 1642) schließt die brennenden, erkrankten Augen. Tausende von Nächten verbrachte er an Schreibpult und Fernrohr. Wie lange noch wird er sehen, lesen, arbeiten können? Wie lange noch wird ein Leben des Forschens und Suchens währen, dem kluge Menschen vieler Länder größte Achtung zollen, ein Leben zugleich ständigen Kampfes gegen Unwissenheit, Dogmatismus und Böswilligkeit, das *Galilei* tiefste Erniedrigung nicht ersparte?

Der Manuskriptstapel, über den die vom Alter gezeichnete Hand streicht, ist eine Zusammenfassung all dessen, was *Galilei* im Laufe eines langen Lebens auf dem Gebiet der Mechanik erforschte.

Das in Gesprächsform abgefaßte Werk beschäftigt sich mit der Bewegung der Körper, mit ihrem Zusammenhalt, ihrer Festigkeit und mit anderen Fragen, die nicht nur Gelehrte interessieren, sondern auch den Architekten, den Ingenieur und den Büchsenmeister.

Sorgfältig hat der Autor vermieden, woran die Heilige Römische Kirche Anstoß nehmen könnte. Niemand wird ihm, wie einst beim »Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische«, unter-

stellen können, er habe in einer seiner Figuren den »Vater der Christenheit« verächtlich machen wollen.

Werden aber Verleger in Venedig oder in Rom es wagen, die Arbeit des der Ketzerei verdächtigen *Galilei* zu drucken? Oder wird er das Manuskript auf Schleichwegen ins Ausland bringen und dort, vielleicht im protestantischen Holland, drucken lassen müssen?

Ketzer! – ist ein schlimmerer Vorwurf denkbar? Doch kann es Ketzerei sein, der Natur nachzuspüren, wie sie wirklich ist und nicht wie die Alten und die Kirchenväter sie sich vorstellten? Darf es Ketzerei genannt werden, den Verstand zu gebrauchen, um das Wissen zu mehren und das Leben zu erleichtern?

Nicht ein Wort würde *Galileo Galilei* von dem zurücknehmen, was er Jahrzehnte zuvor einem Brief anvertraut hatte:

»Wir bringen das Neue nicht, um die Geister zu verwirren, sondern um sie aufzuklären, nicht um die Wissenschaft zu zerstören, sondern um sie wahrhaft zu begründen. Unsere Gegner aber nennen, was sie nicht widerlegen können, falsch und ketzerisch, indem sie sich aus erheucheltem Religionseifer einen Schild machen und die Heilige Schrift zur Dienerin ihrer Absichten erniedrigen.«

Mutige, kühne Worte waren das gewesen! Aber voll tiefster Bitterkeit entsinnt sich *Galilei* auch jener, die er im Büßergewand vor dem Tribunal der Inquisition zu sprechen gezwungen worden war:

»Ich, Galileo Galilei, Sohn des Vincenzo Galilei aus Florenz, siebenzig Jahre alt, stand persönlich vor Gericht und ich knie vor Euch Eminenzen, die Ihr in der ganzen Christenheit die Inquisitoren gegen die ketzerische Verworfenheit seid . . . Es war mir von diesem Heiligen Offizium von Rechts wegen die Vorschrift auferlegt worden, daß ich völlig die falsche Meinung aufgeben müsse, daß die Sonne der Mittelpunkt der Welt ist, und daß sie sich nicht bewegt. Es war mir weiter befohlen worden, daß ich diese falsche Lehre nicht vertreten dürfe, sie nicht verteidigen dürfe, und daß ich sie in keiner Weise lehren dürfe, weder in Wort noch in Schrift . . .

Trotzdem habe ich ein Buch geschrieben und drucken lassen, in dem ich jene bereits verurteilte Lehre behandle . . . Daher bin ich der Ketzerei in hohem Maße verdächtig befunden worden . . .

Ich möchte mich nun vor Euch Eminenzen und vor jedem gläubigen Christen von jenem schweren Verdacht reinigen. Daher schwöre ich mit aufrichtigem Sinn und ohne Heuchelei ab, verfluche und verwünsche jene Irrtümer und Ketzereien und darüber hinaus ganz allgemein jeden irgendwie gearteten Irrtum, Ketzerei oder Sektiererei, die der Heiligen Kirche entgegen ist. Ich schwöre, daß ich in Zukunft weder in Wort noch in Schrift etwas verkünden werde, das mich in einen solchen Verdacht bringen könnte . . .

Ich schwöre auch, daß ich alle Bußen, die mir das Heilige Offizium auferlegt hat oder noch auferlegen wird, genauestens beachten und erfüllen werde . . .

Ich, Galileo Galilei, habe abgeschworen, geschworen, versprochen und mich verpflichtet, wie ich eben näher ausführte. Zum Zeugnis der Wahrheit habe ich diese Urkunde meines Abschwörens eigenhändig unterschrieben und Wort für Wort verlesen, in Rom im Kloster Minerva am 22. Juni 1633.«

10 Kopfschüttelnd löscht *Galilei* die Lampen. Ob man wirklich in Rom annahm,

der entwürdigende Prozeß gegen ihn werde zugleich auch ein tödlicher Schlag gegen die Arbeiten des großen *Nikolaus Kopernikus*, gegen ihre Weiterführung durch *Johannes Kepler* sein? Wußten die Eminenzen wirklich nicht, daß sich die Wahrheit nicht totschrveigen läßt, daß sie selbst mit der Erde, deren Bewegung sie für höllisches Blendwerk hielten, durch den Weltraum reisten?

Freilich, die trotziqe Bemerkung »Und sie bewegt sich doch!« wurde *Galilei* wohl erst später von seinen Anhängern in den Mund gelegt. Er selbst dürfte sie schwerlich gewagt haben. Zuträger der Inquisition überwachten jeden seiner Schritte, jede Äußerung und achteten sorgfältig darauf, daß der Gelehrte alle auferlegten Bußen genau einhielt. Er stand bis an sein Lebensende unter Hausarrest, durfte kaum Besuche empfangen und war von der Außenwelt fast völlig abgeschnitten.

Was er befürchtet hatte, trat ein: In Italien fanden die »Discorsi« keinen Verleger. 1638 erschienen sie in Leiden. Das Titelblatt trägt die Worte »Appresso gli Elsevirii« – gedruckt bei Elzevier (einem noch heute existierenden holländischen Verlagshaus).

Die Fragen, die in den »Discorsi« gestellt und durch Überlegungen, vor allem aber durch Experimente, beantwortet werden, markieren den Beginn der Physik als experimentelle Wissenschaft.

Wie fällt ein Körper? Bereits *Aristoteles* (383 bis 322 v. u. Z.) und seine Anhänger hatten eine Antwort versucht: Die einem Körper innewohnende Eigenschaft der »Schwere« läßt ihn sich zur Erdoberfläche bewegen. Luft dagegen strebt auf Grund ihrer »Leichte« von der Erde empor. Sie schlägt hinter dem fallenden Körper zusammen und treibt ihn so zu immer größerer Geschwindigkeit. Vor allem aber spielt – diese Meinung vertrat *Aristoteles* – das Gewicht des fallenden Körpers eine entscheidende Rolle: Verdoppelt es sich, fällt er doppelt so schnell, verdreifacht es sich, fällt er dreimal schneller usw.

So hatte es *Aristoteles* behauptet, und man hatte es ihm, wenige Zweifler ausgenommen, geglaubt – Jahrhunderte hindurch. Niemand machte sich die Mühe, einmal nachzuprüfen, ob die von *Aristoteles* aufgestellte Behauptung über den Zusammenhang von Gewicht und Zunahme der Fallgeschwindigkeit wirklich »stimmte« (bereits der bloße Augenschein hätte gezeigt, daß das nicht der Fall ist). Für *Galilei* aber zählten als Grundlagen der Naturwissenschaft nicht Behauptungen oder die Auslegung alter Schriften, sondern beobachtbare, nachprüfbare Vorgänge. Wichtigstes Werkzeug solcher Nachprüfungen waren ihm Experimente. Er ließ, wie die Überlieferung (wahrscheinlich zu Unrecht) berichtet, vom Schiefen Turm in Pisa unterschiedlich schwere Körper fallen. Dabei stellte er fest: Die Unterschiede in den Fallzeiten und damit in den Fallgeschwindigkeiten waren so gering, daß die von *Aristoteles* angegebene Regel keinesfalls der Wirklichkeit entsprechen konnte. *Aristoteles* hatte sich geirrt!

Aber auch ohne Experiment, nur durch logische Schlußfolgerungen, kommt *Galilei* zum gleichen Resultat. Verfolgen wir ein Stück der Unterhaltung, die *Sagredo*, *Salviati* und *Simplicio*, die Diskussionsteilnehmer der »Discorsi«, miteinander führen:

»*Salviati*: »Wenn wir zwei Körper haben, deren Geschwindigkeit verschieden sei, so ist es klar, daß, wenn wir den langsameren mit dem geschwinderen vereinen, dieser letztere durch jenen verzögert werden müßte, und jener, der langsamere,

müßte vom schnelleren beschleunigt werden. Seid Ihr hierin mit mir einverstanden?»

Simplicio: »Mir scheint dieser Schluß völlig richtig.«

Salviati: »Aber wenn dies richtig ist, und wenn es wahr wäre, daß ein großer Stein sich zum Beispiel mit 8 Ellen Geschwindigkeit bewegt und ein kleinerer mit 4 Ellen, so würden beide vereinigt eine Geschwindigkeit von weniger als 8 Ellen haben müssen. (Die Elle ist ein altes, von der Unterarmlänge abgeleitetes Streckenmaß.) Nun sind die beiden Steine zusammen doch größer als jener größere Stein, der 8 Ellen Geschwindigkeit hatte; mithin würde sich nun der größere, nämlich durch die Vereinigung gebildete, langsamer bewegen als der kleinere, was gegen Eure Voraussetzung wäre. Ihr seht also, wie aus der Annahme, ein größerer Körper habe eine größere Geschwindigkeit als ein kleinerer, ich Euch weiter folgern lassen konnte, daß ein größerer Körper sich langsamer bewege als ein kleinerer.«

Simplicio: »Ich bin ganz verwirrt . . .«

Aristoteles war durch seine eigenen Behauptungen widerlegt worden. Gewichtsunterschiede können nicht Ursache unterschiedlicher Fallgeschwindigkeit sein. Immerhin – es gibt solche Unterschiede, und sogar Körper gleichen Gewichts fallen verschieden schnell, wenn sie sich in ihrer Form unterscheiden. Ein Blatt Papier pendelt langsam zu Boden; es erreicht ihn weit eher, wenn man es vorher zusammenknüllt.

Galileis Schlußfolgerung ist eindeutig: Wieder ist *Aristoteles* ein Fehler unterlaufen. Die Luft beschleunigt den Fall nicht, sie behindert ihn.

Galilei läßt Körper in Quellwasser, Salzlösung, Öl, Quecksilber und anderen Flüssigkeiten sinken und beobachtet die Geschwindigkeiten. Die Unterschiede sind »im allgemeinen größer in den stärker widerstrebenden Mitteln« – sie sind nur gering im widerstrebenden Mittel Luft:

»Gold, Blei, Kupfer, Porphy und andere schwere Körper fallen mit fast unmerklicher Verschiedenheit in der Luft, Gold aus 100 Ellen Höhe kaum vier Fingerbreit früher als Kupfer. Angesichts dessen glaube ich, daß, wenn man den Widerstand der Luft aufhobe, alle Körper ganz gleich schnell fallen würden.«

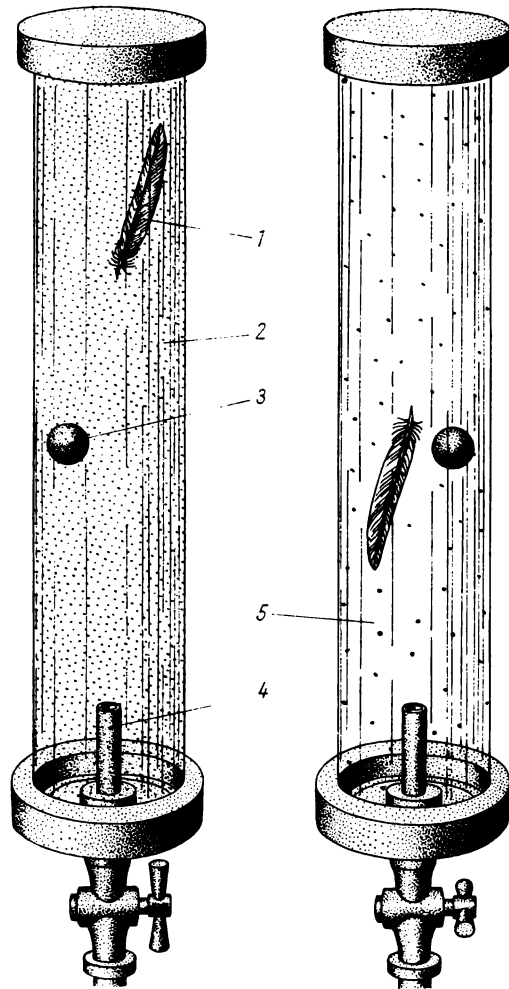
Simplicio antwortet darauf wie noch heute Schüler, bevor sie durch einen Versuch eines Besseren belehrt werden:

»Das ist eine gewagte Behauptung. Ich meinerseits werde nie glauben, daß im luftleeren Raum eine Wollenflocke ebenso schnell wie Blei fallen wird.«

Diesen vom »gesunden Menschenverstand« vorgebrachten Einwurf zu widerlegen, war für *Galilei* nicht einfach. Ein Experiment wie etwa das mit der »Fallröhre« – im Physikunterricht oft vorgeführt – schied aus; eine Pumpe, mit der man einen auch nur annähernd luftleeren Raum herstellen konnte, war noch nicht erfunden. Daher läßt er *Salviati* antworten:

»Nur gemacht, Herr *Simplicio*! Wir wollen die Bewegung der verschiedensten Körper in einem nicht widerstehenden Mittel untersuchen, so daß alle Verschiedenheit auf die fallenden Körper zurückzuführen wäre. Und da nur ein Raum, der völlig luftleer ist, auch keinen anderen Stoff enthält, geeignet erscheint, das zu zeigen, was wir suchen, und da wir einen solchen Raum nicht herstellen können, so wollen wir prüfen, was in feineren und weniger widerstehenden Mitteln ge-

Die Fallröhre zur Demonstration des Falls im luftgefüllten und (annähernd) luftleeren Raum – Überraschung für viele Schülergenerationen: Im Vakuum fallen Blei und Feder gleich schnell
 1 Feder; 2 Luft; 3 Bleikugel;
 4 Stutzen zum Evakuieren; 5 teilweises Vakuum



schiebt, im Gegensatz zu anderen weniger feinen und stärker widerstehenden. Finden wir tatsächlich, daß verschiedene Körper immer weniger verschieden sich bewegen, je nachgiebiger die Mittel sind, und daß schließlich trotz sehr großer Verschiedenheit der fallenden Körper im allerfeinsten Mittel der allerkleinste, ja ein kaum noch wahrnehmbarer Unterschied verbleibt, dann, scheint mir, dürfen wir mit großer Wahrscheinlichkeit annehmen, daß im Vakuum völlige Gleichheit eintreten werde.«

Die Methode, die *Galilei* hier anwendet, um die für alle Körper im luftleeren Raum gleich ablaufende Fallbewegung zu begründen (Annahme eines nicht realisierbaren Idealzustandes, Zurückstellen störender Nebeneffekte), erschien damals noch vielen unerhört kühn. Sie hat sich in allen Bereichen der Wissenschaft tausendfach bewährt:

»Ein Körper behält seinen Bewegungszustand bei, solange keine Kräfte auf ihn einwirken.« So lautet, vereinfacht, eines der wichtigsten mechanischen Gesetze. Durch kein Experiment läßt sich dieses »Trägheitsgesetz« mathematisch exakt nachweisen, denn es gibt keinen »kräftefreien« Körper im Weltall. Trotzdem sind wir von seiner Richtigkeit überzeugt; denn wir können uns ihm weitestgehend nähern und erleben immer wieder, daß die mit seiner Hilfe gewonnenen Resultate richtig sind. Wir untersuchen die Bewegung eines Pendels, dessen Faden wir fürs erste als masselos annehmen, vernachlässigen bei vielen Untersuchungen im Bereich der Elektrizitätslehre den doch stets vorhandenen, wenn auch oft sehr geringen Leitungswiderstand, sprechen von einer Erdkugel, die in Wahrheit ein viel komplizierteres geometrisches Gebilde ist usw. Dort, wo es sich als notwendig erweist, korrigieren wir dann unsere Vereinfachungen.

Auch *Galilei* kommt auf den zunächst vernachlässigten Luftwiderstand zurück: »Ein schwerer Körper« – so *Salviati* – »hat von Natur das Bestreben, sich gegen das gemeinsame Zentrum schwerer Körper zu bewegen, das heißt gegen unseren Erdball, und zwar mit einer stetig und gleichmäßig beschleunigten Bewegung, das heißt so, daß in gleichen Zeiten gleiche neue Geschwindigkeiten hinzugefügt werden. Das tritt allemal ein, wenn alle zufälligen äußeren Hindernisse hinweggeräumt sind; unter diesen gibt es eins, das sich nicht fortschaffen läßt, nämlich das des Mittels, in welchem der fallende Körper sich bewegen soll. Das Mittel setzt der Bewegung, auch wenn es nachgiebig und in Ruhe ist, einen Widerstand entgegen, der je nach Umständen größer oder kleiner ist, und zwar um so größer, je geschwinder es sich öffnen muß, um den Körper hindurchzulassen.

Letzterer erfährt daher, obgleich er von Natur beschleunigt fällt, einen stets wachsenden Widerstand. Dadurch entsteht eine Verzögerung und Verminderung aller neuerworbenen Geschwindigkeiten, so daß schließlich alle Beschleunigung aufgehoben wird und der Körper in eine gleichförmige Bewegung gerät, in welcher er fernerhin verharrt.«

Galilei weiß, daß zum Beispiel Regentropfen nur eine bestimmte Höchstgeschwindigkeit erreichen, die sie dann bis zu ihrem Auftreffen beibehalten. Um den Einfluß des Luftwiderstands nachzuweisen, schlägt er folgenden Versuch vor:

Gleiche Kugeln sollten aus sehr unterschiedlichen Höhen senkrecht nach unten auf eine Metallplatte geschossen werden. Dann würde, durch den Luftwiderstand gehemmt, die Kugel aus größerer Höhe die Platte mit niedrigerer Geschwindigkeit erreichen als die aus geringerer Höhe.

Versuchen wir nun, den Gedankengängen zu folgen, mit deren Hilfe *Galileo Galilei* das Fallgesetz ableitete. Er ging dabei vom Trägheitsgesetz aus, das zwar erst *Newton* (s. u.) exakt formulierte, das aber meistens stillschweigend schon als gültig vorausgesetzt wurde. Ein fallender Stein, überlegte *Galilei*, würde seine Richtung und die ihm anfangs erteilte Geschwindigkeit beibehalten, wenn keine Kraft auf ihn wirkte. In Wirklichkeit jedoch unterliegt er, wie jeder Körper, ständig der Anziehungskraft der Erde, seine Geschwindigkeit nimmt ununterbrochen zu. Nicht auf die Bewegung oder auf die Geschwindigkeit »an sich« kommt es an, sondern auf ihre Veränderungen.

Um die Erscheinungen beim Fall zahlenmäßig zu beschreiben, stellte sich *Galilei* zwei Fragen: Welche Geschwindigkeit hat der fallende Körper nach einer be-

stimmten Zeit erreicht, beziehungsweise wie groß ist, auf die Zeit bezogen, sein Geschwindigkeitszuwachs? Welche Wegstrecke legt der Körper während dieser Zeit zurück?

Der Stein beginnt, einmal losgelassen, mit »unermesslich« geringer Geschwindigkeit zu fallen; denn, so argumentiert *Galilei*, beim Wurf nach oben verlangsamt er sich stetig bis zum Stillstand und fängt dann seine Bewegung in umgekehrter Richtung an.

Erfährt nun der Körper in einem ersten kleinen, als Einheit gewählten Zeitabschnitt den Geschwindigkeitszuwachs, die Beschleunigung g (wir bedienen uns der heute üblichen Bezeichnung), in der zweiten, dritten usw. Zeiteinheit jeweils immer den gleichen Geschwindigkeitszuwachs, so addieren sich die neuen Zunahmen zu den bereits vorhandenen. Nach t Zeiteinheiten hat der Körper eine Endgeschwindigkeit v erreicht, die sich aus der Beziehung

$$v = g t$$

errechnen läßt.

Und die durchfallene Wegstrecke?

Galilei erhielt sie durch folgende Überlegung: Die Geschwindigkeit des fallenden Körpers nimmt während der Zeitspanne t gleichmäßig zu und erreicht an ihrem Ende den Wert v . Nach halber Fallzeit $t/2$ beträgt sie $v/2$. Vorher ist sie kleiner, danach größer als $v/2$.

Weil aber die Geschwindigkeit gleichmäßig zunimmt, wird dem Körper in der zweiten Zeithälfte »zusätzlich« an Geschwindigkeit mit auf den Weg gegeben, was ihm in der ersten Zeithälfte »fehlte«. Fehlbetrag und Zuwachs gleichen einander aus. Daraus folgt, daß der Körper in der Zeit t die gleiche Strecke zurücklegt, als habe er sich ununterbrochen mit der gleichbleibenden Geschwindigkeit $v/2$ bewegt. Nennt man diese Strecke s , gilt

$$s = \frac{v}{2} t,$$

und wenn für v der oben abgeleitete Wert $v = g t$ eingesetzt wird,

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

eine Formel, die in jedem Physikbuch zu finden ist.

Eine unmittelbare experimentelle Nachprüfung dieses Gesetzes, vor allem aber die Bestimmung der »Fallbeschleunigung« g , setzt sehr genaue Messungen von Fallweg und Fallzeit voraus. Eine präzise Zeitmessung jedoch war damals so gut wie unmöglich. Uhren, so »genau«, daß sie heutzutage jeder Käufer selbst bei bescheidensten Ansprüchen empört zurückweisen würde, gab es noch nicht – an Stoppuhren oder andere Kurzzeitmesser war noch nicht zu denken.

So war *Galilei* auf ein Zeitmeßverfahren angewiesen, das wir wegen seiner Primitivität zwar belächeln mögen, das uns aber gerade deswegen Bewunderung für die Leistung derjenigen abnötigt, die mit seiner Hilfe experimentierten und brauchbare Resultate erzielten:

Ein Loch im Boden eines mit Wasser gefüllten Gefäßes wurde mit dem Finger 15

verschlossen und nur während der Versuchsdauer freigegeben. Anschließend wurde das ausgelaufene Wasser gewogen und daraus auf die Zeit zurückgeschlossen.

Zunächst erhielt *Galilei* keine befriedigenden, eindeutigen Resultate. Er war ein viel zu gewissenhafter, selbstkritischer Beobachter und Experimentator, als daß er sich mit ihnen zufrieden gegeben hätte.

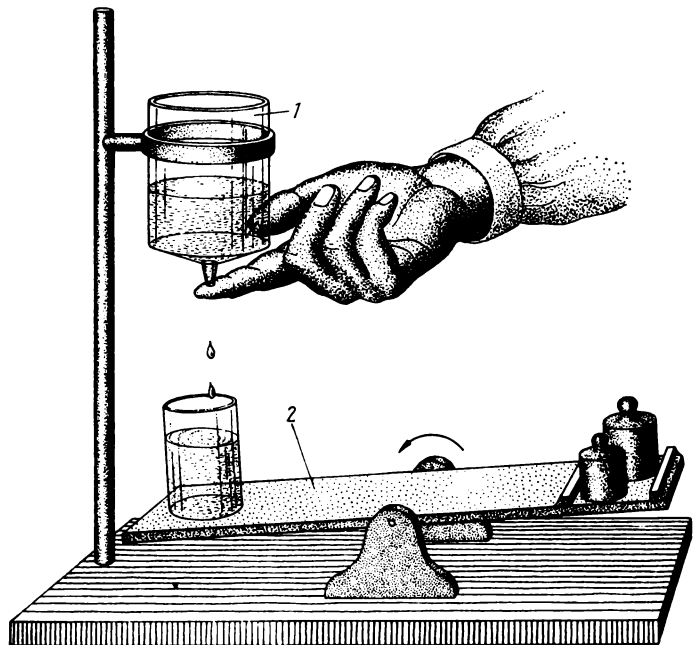
Wenn, so überlegte *Galilei*, die Fallbewegung zu rasch abläuft, um genau gemessen zu werden, muß man versuchen, sie zu verlangsamen (sie »in Zeitlupe« zu betrachten, würden wir heute sagen), ohne dabei die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten zu verletzen.

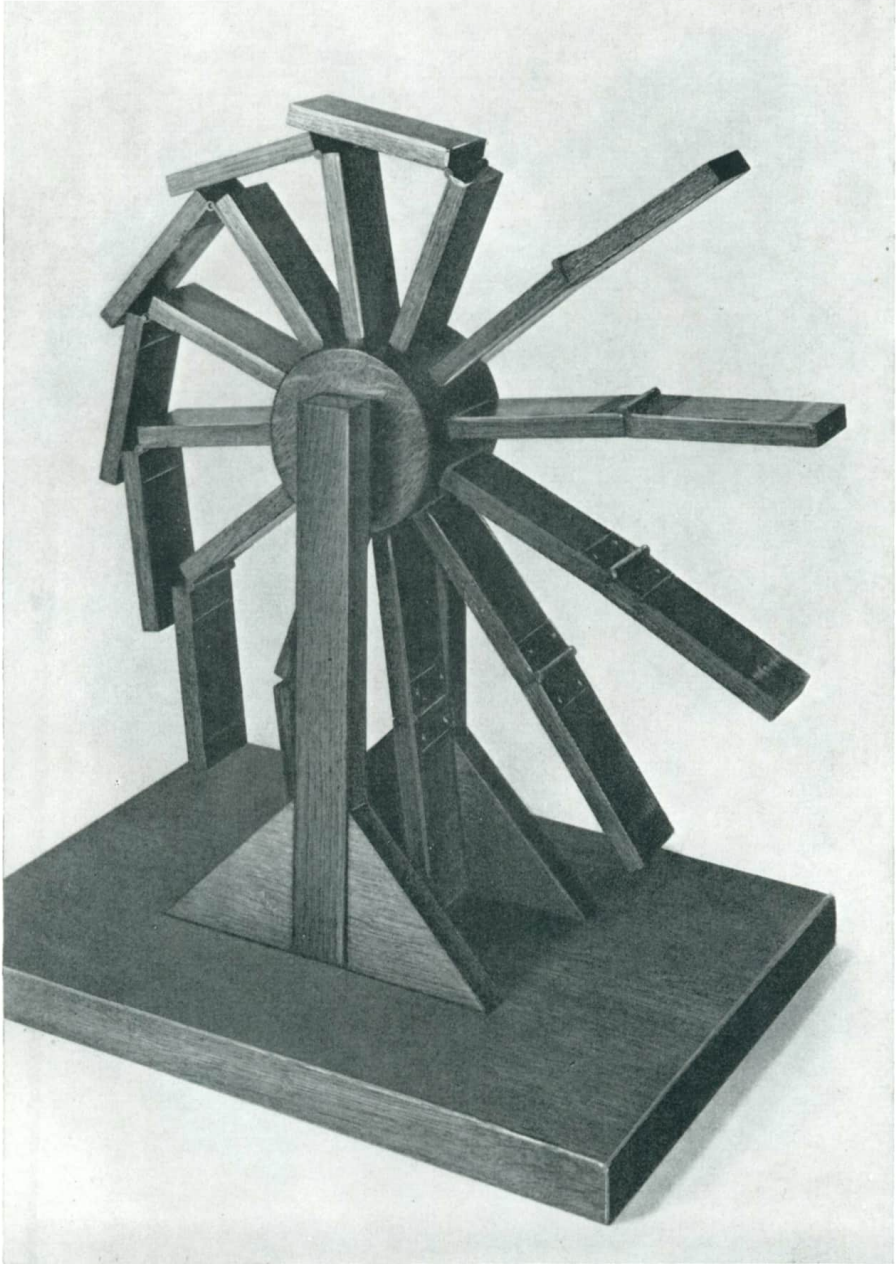
Ursache für das Fallen der Körper ist ihre Anziehung durch die Erde. Aus dem gleichen Grunde, daran zweifelte *Galilei* nicht, rollen Wagen von allein bergab, strömt Wasser talwärts. Ein Wagen aber kommt um so schneller in Fahrt, je steiler die Straße ist. Auf einer waagerechten Ebene bleibt er stehen, und er würde einfach fallen, wenn man die Straße »senkrecht stellte«.

Es sollte demnach möglich sein, die Fallbewegung auf dem Umweg über die geneigte Ebene, die schiefe Ebene, zu untersuchen. Allerdings mußte dabei der Einfluß der Reibung möglichst gering gehalten werden. Folgen wir – wenn auch nicht in aller Ausführlichkeit – der Beschreibung, die *Galilei* von seiner Versuchsanordnung gab:

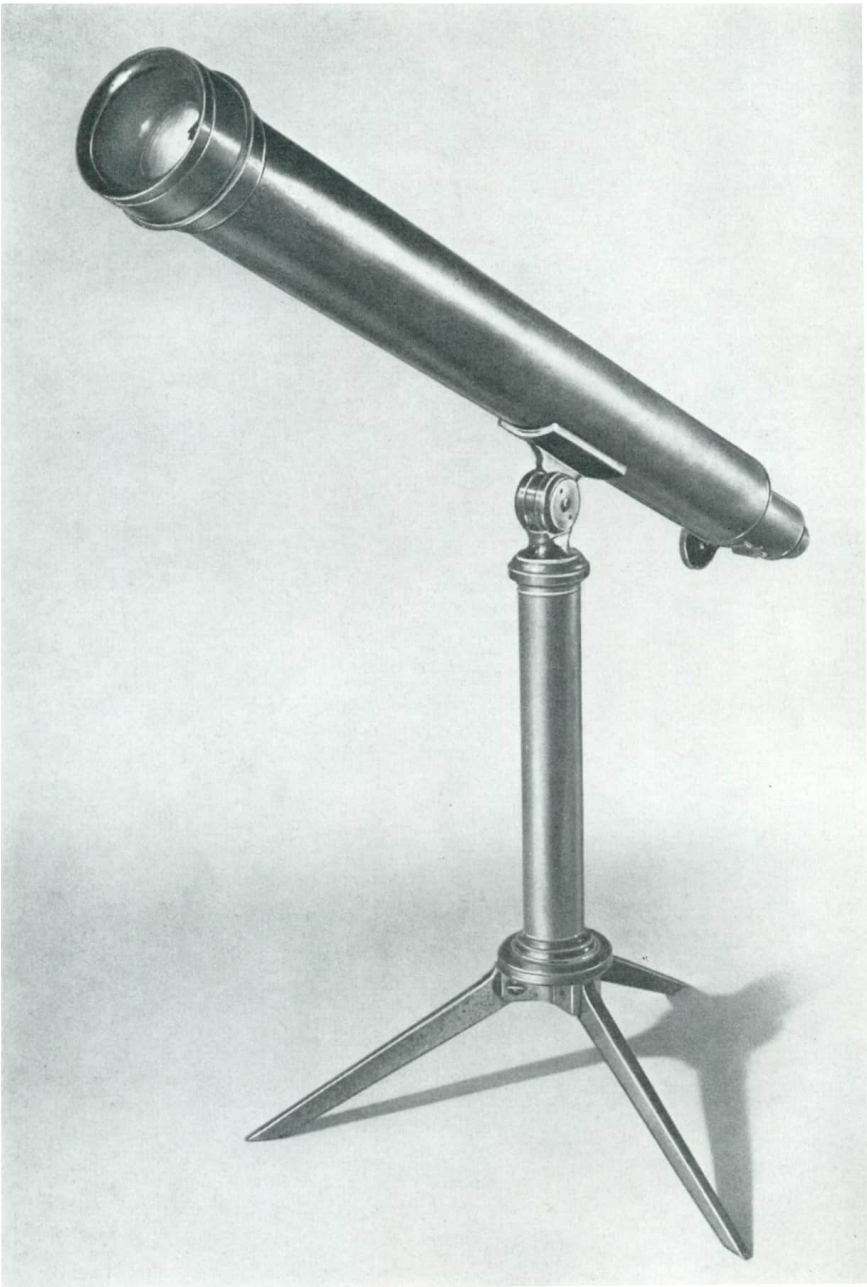
»In einem Brett von 12 Ellen Länge ließ ich eine Rinne von der Breite eines halben Zoll herstellen. (Der Zoll ist eine alte, von der Länge des ersten Daumengliedes hergeleitete Streckeneinheit. Der heute bisweilen noch benutzte Zoll beträgt

Prinzip der Galileischen Methode
zur Zeitmessung
1 Vorratsgefäß; 2 Waage

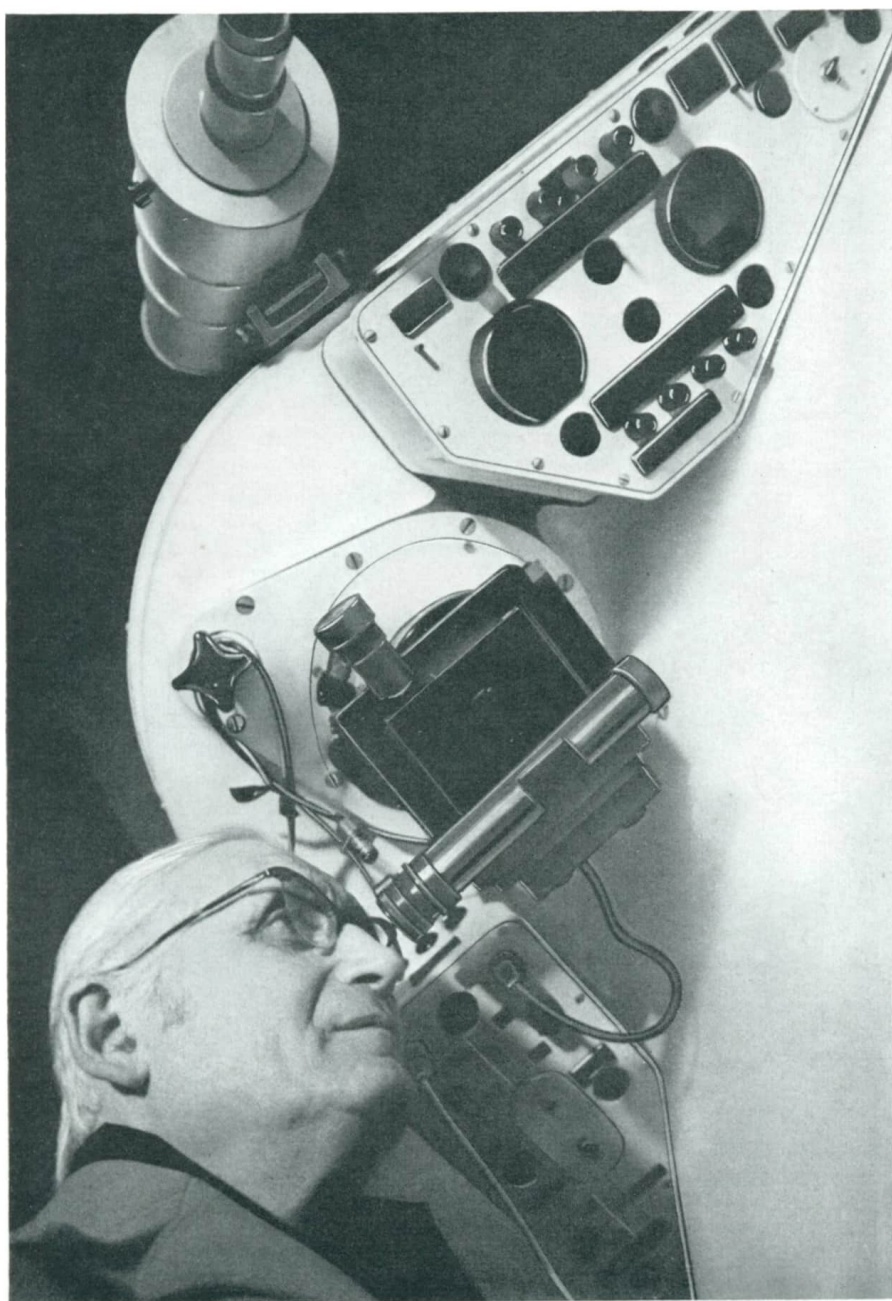




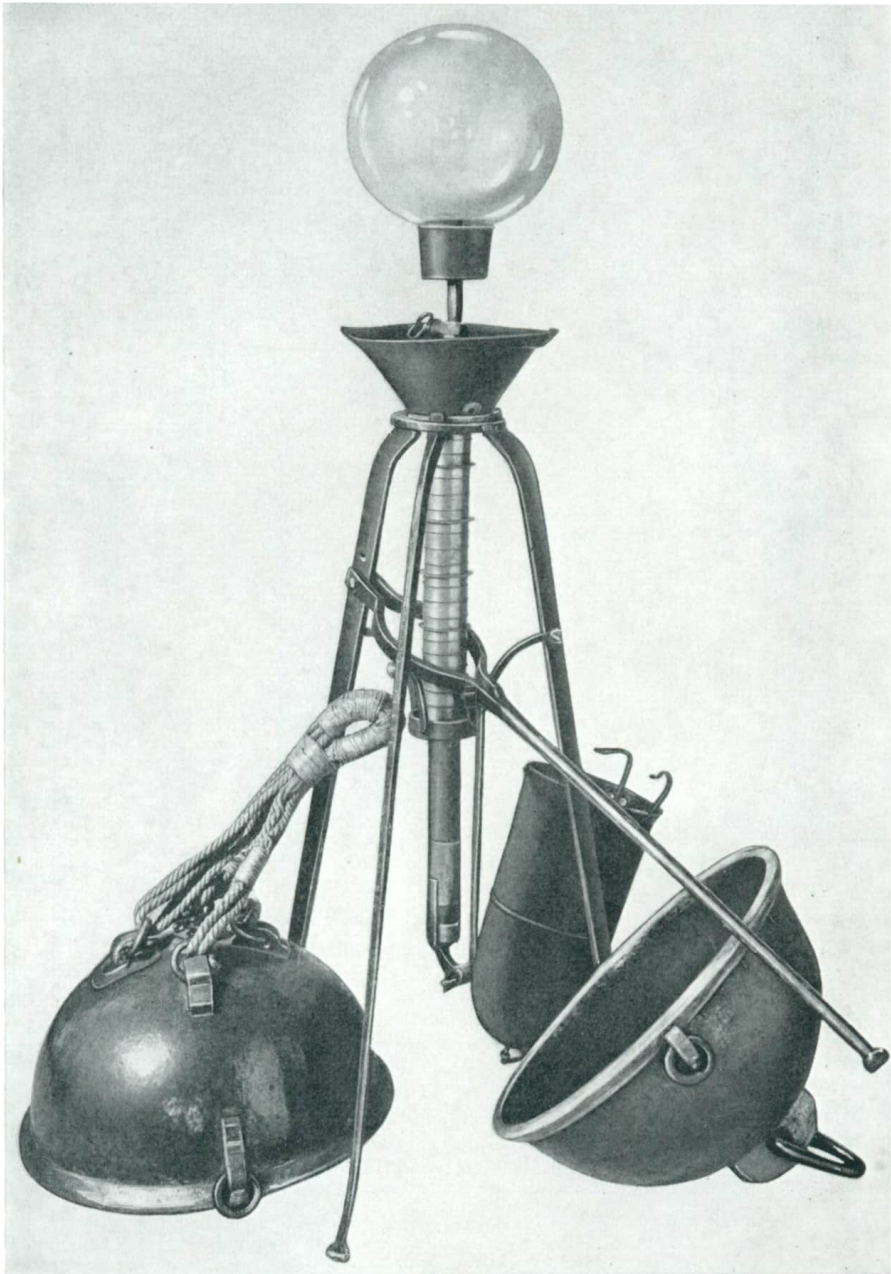
Modell eines Perpetuum mobile, das die Schwerkraft nutzen sollte (Mariano, um 1440). Foto: Deutsches Museum München



Achromatisches Linsenfernrohr aus
der Fraunhoferschen Werkstatt um
1815. Foto: G. Linde, Jena



Universal-Spiegelteleskop des Karl-Schwarzschild-Observatoriums in Tautenburg bei Jena. Foto: Zentralbild



Magdeburger Halbkugeln und Luft-
pumpe von Otto von Guericke (1663).
Foto: Deutsches Museum München

25,4 mm.) Sie wurde geglättet und mit sehr glattem Pergament ausgekleidet. Das Brett wurde darauf an dem einen Ende gehoben, bald eine, bald zwei Ellen hoch. Sodann ließ ich eine glatt polierte Messingkugel durch die Rinne laufen und bestimmte die Fallzeit für die ganze Länge der Rinne. Ließ ich dagegen die Kugel nur durch die viertelste Abmessung der Rinne laufen, erforderte dies genau die halbe Zeit.

Allgemein fand ich: Die durchlaufenen Strecken verhielten sich wie die Quadrate der Zeiten. Daß dieses Gesetz nicht nur in dem gewählten Beispiel seine Richtigkeit hat, sondern eine für alle Fälle zutreffende Regel ist, wurde durch hundertfache Wiederholung unter jedesmaliger Abänderung der Strecke und des Neigungswinkels dargetan.»

Daß sich die durchlaufenen Strecken »wie die Quadrate der Zeiten« verhielten, entsprach der Formel für den Fallweg. Auch eine zweite Feststellung zeigte die enge Verbindung mit dem »freien« Fall:

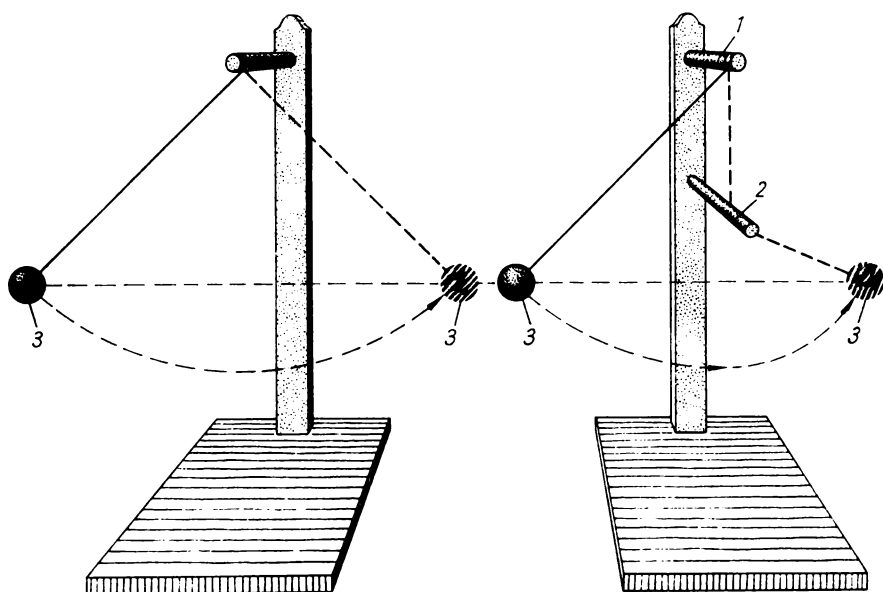
Die Endgeschwindigkeit, mit der (bei Vernachlässigung von Reibung und Luftwiderstand) ein Körper am unteren Ende der schiefen Ebene anlangt, hängt nur von Höhenunterschieden, nicht aber von der Wegstrecke auf der Ebene ab. Sie stimmt mit der Geschwindigkeit überein, die der Körper beim freien Durchfallen derselben Höhe erreichen würde.

Auf wenig geneigter Bahn nimmt die Geschwindigkeit der rollenden Kugel zwar nur langsam, aber über einen größeren Weg zu; bei einer gleich hohen, jedoch steilen Ebene erfolgt auf einer kürzeren Wegstrecke eine größere Geschwindigkeitszunahme.

Schob man zwei schiefe Ebenen mit ihren unteren Enden gegeneinander, rollte die Kugel auf der Gegenseite wieder bergauf, und zwar (bei Vernachlässigung von Widerständen) bis zur Ausgangshöhe. Auch hierfür fand *Galilei* eine Erklärung, in der er Gedanken anklingen läßt, deren Weiterführung und Ausbau zwei Jahrhunderte später im Gesetz von der Erhaltung der Energie (s. S. 75) ihren allgemeinsten Ausdruck fanden.

Immer wieder aber kommt der Gelehrte auf das Problem der den Bewegungsablauf störenden und damit die Ergebnisse verfälschenden Widerstände zurück. Bei der geringen Beschleunigung auf der schiefen Ebene macht sich zwar der Luftwiderstand nur wenig bemerkbar, doch kommt der Widerstand der »Rollreibung« neu hinzu. Um ihn auszuschalten, hängt *Galilei* die Versuchskörper an langen, dünnen Fäden auf und läßt sie nicht mehr rollen, sondern schwingen. Damit wird aus dem Rollen oder Gleiten auf der schiefen Ebene eine Pendelbewegung – auch sie ist ein Sonderfall der Fallbewegung.

Galilei findet bestätigt, daß der Pendelkörper nach dem Durchschwingen wieder seine Ausgangshöhe erreicht, und das sogar dann, wenn der Pendelfaden zum Beispiel durch einen seinen Weg kreuzenden Stift geknickt wird. Er entdeckt die wichtige Beziehung, daß man die Länge eines Pendels vervierfachen (bzw. verneunfachen usw.) muß, wenn seine Schwingungsdauer auf das Doppelte (bzw. Dreifache usw.) ansteigen soll, und findet, daß die Schwingungsdauer eines gegebenen Pendels konstant bleibt und sogar von der Schwingungsweite unabhängig ist. (Erst später stellte sich heraus, daß dieses Gesetz nur mit gewissen Einschränkungen, nämlich für kleine Schwingungsamplituden, gilt.)



Eine Beobachtung Galileis:
 Der Pendelkörper erreicht stets seine
 Ausgangshöhe
 1 Aufhängepunkt; 2 Knickele;
 3 Umkehrpunkte

Diese Eigenschaft des Pendels sollte sich rasch als nahezu unschätzbar erweisen. *Galilei* nützte sie, um die oben erwähnten Schwierigkeiten zu umgehen. Bei astronomischen Beobachtungen diente ihm ein von Zeit zu Zeit angestoßenes Pendel als Zeitmesser. Bei jedem Hin- und Herschwingen rückte eine Borste das Antriebsrad eines Zählwerks um einen Zahn weiter. Bis zur Konstruktion einer Pendeluhr blieb nur ein kleiner Schritt. *Galilei* vollzog ihn nicht, obwohl er eine Konstruktions-skizze hinterließ. So kommt das Verdienst, die Pendeluhr erfunden zu haben, dem Holländer *Christian Huygens* (1629 bis 1695) zu. Sie fand nicht nur als Zeitmesser im täglichen Leben schnell Verwendung, sondern wurde, häufig verbessert, dem Physiker ebenso unentbehrlich wie die Waage dem Chemiker.

Nicht nur ein senkrecht nach oben, sondern auch jedes schräg abgefeuerte Geschöß fällt nach einer gewissen Zeit bzw. Strecke auf die Erdoberfläche zurück. Darüber hatte man schon lange vor *Galilei* nachgedacht und war teilweise zu recht kuriosen Vorstellungen über die Flugbahn gekommen. So behaupteten namhafte Mathematiker, eine abgefeuerte Kugel, ein geworfener Stein fliege zunächst in gerader Linie, beschreibe anschließend ein Kreisbogenstück und falle schließlich – sozusagen erschöpft – senkrecht zur Erde.

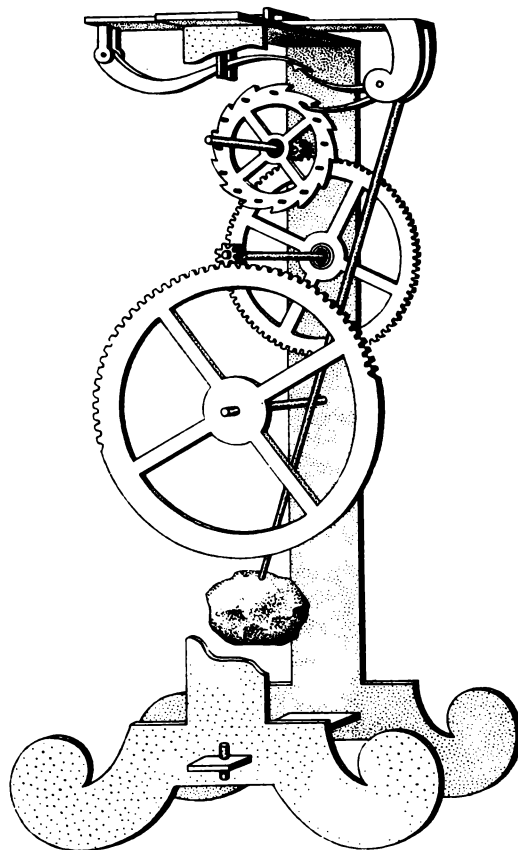
Galilei räumt mit diesen falschen oder halbrichtigen Vorstellungen auf und benutzt dazu ausschließlich Beziehungen, die entweder bereits bekannt (wenn auch nicht immer klar ausgesprochen) oder erst von ihm entdeckt worden sind.

Eine Kugel, reibungs- und luftwiderstandsfrei auf ebener Platte einmal angestoßen, würde auf Grund ihres Beharrungsvermögens, ihrer Trägheit, bis in alle Ewigkeit mit unverminderter Geschwindigkeit geradeaus weiterrollen. Diese Bewegung »verschwindet« auch dann nicht, wenn die Kugel über die Kante der Ebene rollt; nur kommt jetzt eine weitere Bewegung, das Fallen, hinzu. Beide Bewegungen setzen sich zur resultierenden Flugbahn zusammen.

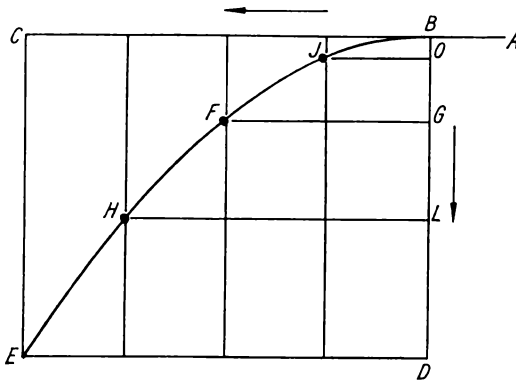
Während jedoch die in waagerechter Richtung in gleichen Zeitabschnitten zurückgelegten Strecken stets gleich bleiben, nehmen die senkrechten Wege in jedem Zeitabschnitt nach dem Fallgesetz »mit dem Quadrat der Zeiten« zu.

Beide Bewegungen zusammen ergeben ein parabelförmiges Kurvenstück, die »Wurfparabel«.

Aus der Zusammensetzung der voneinander unabhängigen Einzelbewegungen folgte eine Behauptung *Galileis*, die selbst physikalisch beschlagene Zeitgenossen anzweifelten: Wird eine Kugel – etwa von einem Turm – waagrecht abgeschossen und gleichzeitig eine zweite einfach fallengelassen, erreichen beide gleichzeitig den Boden. Seien wir ehrlich: Auch uns fällt das zu glauben zunächst einmal schwer. Doch so oft man in den vergangenen Jahrhunderten diesen Versuch ausführte,



Galileis Entwurf einer Pendeluhr



Entstehen der Wurfparabel (nach einer Skizze Galileis): Die gleichförmige Bewegung eines Körpers in Richtung A-C und die in B beginnende Fallbewegung in Richtung B-D setzen sich zu einer Parabelbahn B-J-F-H-E zusammen

stets zeigte sich, daß *Galilei* recht gehabt hatte (eine ebene Erdoberfläche vorausgesetzt).

Der Wurf in senkrechter oder in waagerechter Richtung ist ein Sonderfall der Wurfbewegung unter beliebigem Winkel. *Galilei* untersucht sie ebenfalls, führt sie wieder auf das Zusammentreffen einer gleichförmigen und einer beschleunigten Bewegung zurück und findet Gesetzmäßigkeiten, die heute zu den Grundlagen der Bewegungslehre gehören – zum Beispiel, daß Abwurf- und Aufschlagwinkel übereinstimmen, daß die größte Wurfweite bei einem Abwurfwinkel von 45° erreicht wird und daß jeder nähere Punkt unter zwei Winkeln, symmetrisch zum 45° -Winkel getroffen werden kann.

Auch bei diesen Herleitungen vernachlässigt *Galilei* den Luftwiderstand, doch er weist mehrfach darauf hin, daß dieser eine Abweichung von der Parabelform bewirkt. Ebenso vermerkt er, daß bei größeren Schußweiten die Erdoberfläche nicht mehr als Ebene betrachtet werden kann, sondern die Kugelgestalt der Erde zu berücksichtigen ist.

Wir sollten *Galilei* nicht verübeln, daß er solche Einflüsse nicht im einzelnen untersuchte. Wie kompliziert die »ballistische Kurve« in Wirklichkeit ist, stellte sich erst viel später heraus. Mathematisch voll erfaßbar wurde sie erst im Zeitalter der Rechenautomaten.

Kehren wir nochmals zu den Experimenten und Schlußfolgerungen *Galileis* zurück. Sie blieben, im Sinne des Wortes, irdisch, denn *Galilei* betrachtete Fall- und Wurfbewegung nur in unmittelbarer Nähe der Erdoberfläche. Die Ursachen dieser Bewegung kümmerten ihn nicht; auch versuchte er nicht, seine Erkenntnisse auf die Bewegungen der Himmelskörper zu übertragen.

Nachgewiesen zu haben, daß die Gesetze der Mechanik nicht nur auf der Erde, sondern ebenso im Weltraum für die Bewegungen der Planeten, für die Bahnen der Kometen gelten, ist das Verdienst *Isaac Newtons* (1643 bis 1727). Seine Leistungen auf dem Gebiet der Mechanik, der Mathematik und der Optik (s. S. 85) werden für alle Zeiten unvergessen bleiben, und die von ihm formulierten Axiome der Mechanik dürften auch im dritten Jahrtausend unserer Zeitrechnung noch zum Grundwissen jedes Schülers gehören. Nicht zuletzt dem Einfluß der Arbeiten *Newtons* ist es zuzuschreiben, daß es bis weit in das 19. Jahrhundert als erklärtes Ziel galt, alle physikalischen Erscheinungen auf die Mechanik zurückzuführen. Die

in *Newtons* »Regeln zur Erforschung der Natur« (*regulae philosophandi*) aufgestellten Grundsätze der induktiven Methode können auch heute noch als beispielgebend gelten.

Was für *Newton* letzter Anlaß war, sich der Fallbewegung und ihrer Ursache zuzuwenden, überlieferte unter anderen *Voltaire*:

»Eines Tages, es war im Jahre 1666, beobachtete *Newton* während eines Landaufenthalts, wie die Früchte von einem Baum fielen. Infolgedessen versank er, wie mir seine Nichte erzählte, in Nachdenken über die Ursache, welche alle Körper zwingt, sich gegen den Mittelpunkt der Erde zu bewegen.

Welches ist, so fragte er sich, diese Kraft? Sie würde auf die Frucht, die soeben vom Baume fiel, auch wirken, wenn sie sich in einer Höhe von 3000, selbst 10 000 Toisen befänden. (Ein Toise entspricht etwa 1,95 m.) Wenn dem so ist, so muß sie auch von dem Orte, wo sich die Mondkugel befindet, bis zum Zentrum der Erde wirken. Und weiter muß die Kraft dieselbe sein, welche Planeten gegen die Sonne treibt und die Monde des Jupiter um diesen sich bewegen läßt. Ein Körper, der sich an der Stelle des Mondes befindet, und ein Körper in der Nähe der Erde müssen also beide auf die Erde zustreben, und zwar nach einem bestimmten Gesetz, das eine gewisse, von den Entfernungen abhängige Größe zum Ausdruck bringt.

Um sich also darüber Gewißheit zu verschaffen, ob dieselbe Ursache die Planeten in ihre Bahn zwingt, die auf der Erde den freien Fall bewirkt, bedarf es lediglich der Messung. Man hat nur nötig zu untersuchen, welchen Raum ein Körper auf der Erde und ein solcher in der Entfernung des Mondes von der Erde in einer gegebenen Zeit durchfallen. Der Mond selbst ist ein Körper, den man als gegen die Erde fallend betrachten kann, und zwar durchfällt er in jedem Augenblick das Stück, um das er sich von der Tangente seiner Bahn entfernt. Man muß also genau die Entfernung des Mondes von der Erde kennen, und dazu ist wieder nötig, daß die Größe unserer Erdkugel bekannt ist.«

Es ist also ein und dieselbe Kraft, die nicht nur den Apfel, den Stein, ein Geschöß zur Erde fallen läßt, sondern auch den Mond und die Planeten in ihre Bahn zwingt. Dieser Gedanke ist genial – und zugleich ein kühner Angriff auf die damals noch verbreiteten Vorstellungen einer »irdischen« und einer von ihr getrennten »himmlischen« Welt.

Die Bewegungen des Steins und der Himmelskörper und die sie verursachenden Kräfte mußten sich demnach, so schließt *Newton*, durch ein Gesetz ausdrücken lassen, feststellbar zum Beispiel, indem man die vom Mond und einem Körper an der Erdoberfläche in gleichen Zeiten durchfallenen Strecken zueinander in Beziehung setzte.

Doch es gelang nicht, eine »vernünftige«, in einem übersichtlichen mathematischen Ausdruck formulierbare Beziehung zu finden. Das lag jedoch nicht an *Newton*, sondern an der Ungenauigkeit damaliger Messungen: Der für den Erdumfang angenommene Wert, den er einsetzte, war um mehr als 10 % zu klein.

Erst 1682 standen dem Gelehrten korrigierte, durch eine neue Gradmessung in Frankreich erhaltene Werte zur Verfügung. Mit ihnen hatte *Newton* Erfolg. Das Ergebnis erregte ihn so, daß er – wie er selbst bekannte – einen Freund bitten mußte, die Rechnung zu beenden.

Die »Fallbeschleunigung« des 60 Erdradien entfernten Mondes betrug $1/3600$, den $(60 \cdot 60)$ sten Teil der Fallbeschleunigung an der Erdoberfläche. Die von *Newton* gesuchte Beziehung existierte und lautete: Die Fallbeschleunigung ist dem Quadrat der Entfernung vom Erdmittelpunkt umgekehrt proportional.

Newton blieb nicht bei dieser Erkenntnis stehen. Daraus, daß an der Erdoberfläche alle Körper, unabhängig von ihrer Masse, mit gleicher Beschleunigung fallen, folgerte er:

Die Anziehungskraft der Erde ist der Masse des angezogenen Körpers, zum Beispiel derjenigen des fallenden Steins, proportional und drückt sich in seinem Gewicht aus. Aber die Erde zieht nicht nur den Mond, sondern umgekehrt dieser auch die Erde an. Diese Wechselwirkung gilt für alle Körper im Weltall, gleich, welche Masse sie haben und in welcher Entfernung voneinander sie sich befinden. Die »Schwerkraft«, die sich *Newton* als »unendlich schnell« und ohne Beteiligung eines Zwischenmediums wirkend, als »Fernkraft« vorstellt, findet ihren Ausdruck im Gravitationsgesetz:

Zwei Körper ziehen einander mit einer Kraft an, die dem Produkt ihrer Massen unmittelbar, dem Quadrat ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist.

Die Gleichung lautet:

$$F = G \cdot \frac{m \cdot m_2}{r^2}$$

Hierin bedeuten m_1 und m_2 die einander anziehenden Massen, r ihren Abstand und der (von den benutzten Maßeinheiten abhängige) Proportionalitätsfaktor G die »Gravitationskonstante«.

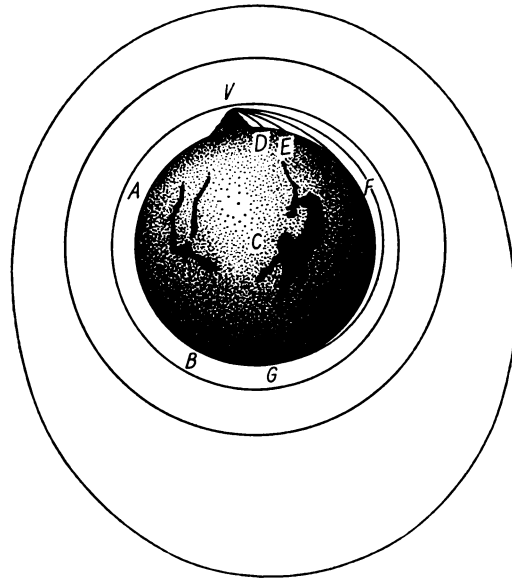
Sandkörnchen unterliegen gegenseitiger Anziehung ebenso wie Himmelskörper – das war schwer vorstellbar. Daher sagte *Newton* in seinen »Mathematischen Grundlagen der Naturwissenschaft« (»Philosophiae naturalis principia mathematica«, 1687):

»Wenn jemand... den Einwurf machen wollte, daß nach diesem Gesetz alle Körper auf Erden gegeneinander gravitieren müßten und daß diese gegenseitige Schwere doch nicht bemerkbar sei, so antworte ich: Die wechselseitige Anziehung oder Schwere der Körper verhält sich zu ihrer Schwere gegen die Erde wie die Masse der Körper zur Masse der Erde. Die wechselseitige Anziehung ist daher bei weitem nicht stark genug, um wahrgenommen werden zu können.«

Tatsächlich sind die Anziehungskräfte selbst zwischen großen Massen so gering, daß sie mit technischen Mitteln zu *Newtons* Zeit nicht unmittelbar nachzuweisen waren. Doch zeigte *Newton* die Gültigkeit seines Gravitationsgesetzes auf folgende Weise:

Johannes Kepler (1571 bis 1630) hatte durch Auswertung umfangreichen Beobachtungsmaterials herausgefunden, daß sich Planeten nicht (wie *Kopernikus* angenommen hatte) auf Kreisbahnen um das Zentralgestirn bewegen, sondern Ellipsen durchlaufen, für die *Kepler* die nach ihm benannten Gesetze aufstellte.

Newton leitete die Keplerschen Gesetze aus dem Gravitationsgesetz ab. Mehr noch: Er erklärte auch die von *Kepler* nicht berücksichtigten Störungen der Planetenbewegung, verursacht von der zwischen allen Körpern wirkenden Anziehungskraft. Die Bahnen der Kometen, die Bewegungen der Jupitertrabanten ergaben

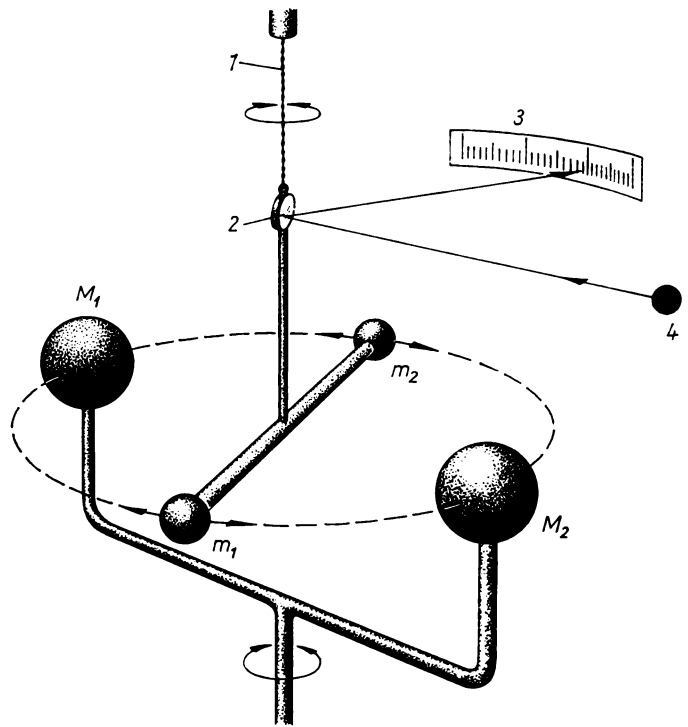


Newton erklärt das Zustandekommen einer Satellitenbahn

sich ebenso aus dem Gravitationsgesetz wie der Verlauf von Ebbe und Flut, den *Newton* ausführlich und richtig begründete.

Geradezu verblüffend ist *Newtons* Extrapolation der Wurfbewegung:

»Ein geworfener Stein wird, indem ihn seine Schwere antreibt, vom geraden Wege abgelenkt und fällt, indem er eine krumme Linie beschreibt, zuletzt zur Erde. Wird er mit größerer Geschwindigkeit geworfen, so geht er weiter fort; und so könnte es geschehen, daß er einen Bogen von 10, 100, 1000 Meilen beschrieb und zuletzt über die Grenzen der Erde hinausginge und nicht mehr zurückfiel. Es bezeichne *A-F-B* die Oberfläche der Erde, *C* ihren Mittelpunkt und *V-D*, *V-E*, *V-F*, *V-G* krumme Linien, die ein von der Spitze *V* eines sehr hohen Berges in horizontaler Richtung und mit wachsender Geschwindigkeit geworfener Körper beschreibt. Damit der Widerstand der Luft nicht in Rechnung zu kommen braucht, wollen wir sie uns ganz fortgenommen denken. Auf dieselbe Weise, wie der mit zunehmender Geschwindigkeit geworfene Körper die Bögen *V-D*, *V-E* und *V-F* beschreibt, wird er endlich, wenn die Geschwindigkeit noch weiter vergrößert wird, über den Umfang der Erde fortgehen und zu dem Berge, von welchem er geworfen wurde, zurückkehren. Da nun nach den Sätzen, welche von der Zentrifugalkraft handeln, die Geschwindigkeit bei der Rückkehr zum Berge nicht kleiner als beim Ausgange sein kann, so muß der Körper fortfahren, sich in derselben Weise um die Erde herumbewegen. Denken wir uns Körper aus höheren Punkten in horizontaler Richtung fortgeworfen, und zwar aus Punkten, welche 10 Meilen, 100 Meilen oder ebensoviele Halbmesser über der Oberfläche der Erde liegen, so werden sie . . . Kurven beschreiben, die entweder konzentrisch oder exzentrisch sind. Und in diesen Bahnen werden sie fortfahren, nach der Weise der Planeten den Weltraum zu durchwandern.«



Prinzip der Drehwaage zur Messung
der Gravitationskonstanten

1 drillbarer Draht; 2 Spiegel;
3 Skale; 4 Lichtquelle;

Drücken wir uns heute sehr viel anders aus, wenn wir erklären wollen, warum ein die Erde oder einen anderen Himmelskörper umkreisender Satellit nicht »abstürzt«?

Zwei Aufgaben blieben zu *Newtons* Zeiten ungelöst: der experimentelle Nachweis der gegenseitigen Anziehung von Körpern auf der Erdoberfläche und die Messung der Gravitationskonstanten. Gerade ihre Kenntnis war für die Astronomie von größter Wichtigkeit, würde sie es doch ermöglichen, nicht nur die Erdmasse, sondern (wiederum mit Hilfe des Gravitationsgesetzes) auch die Massen anderer Himmelskörper auf verhältnismäßig einfache Weise zu errechnen.

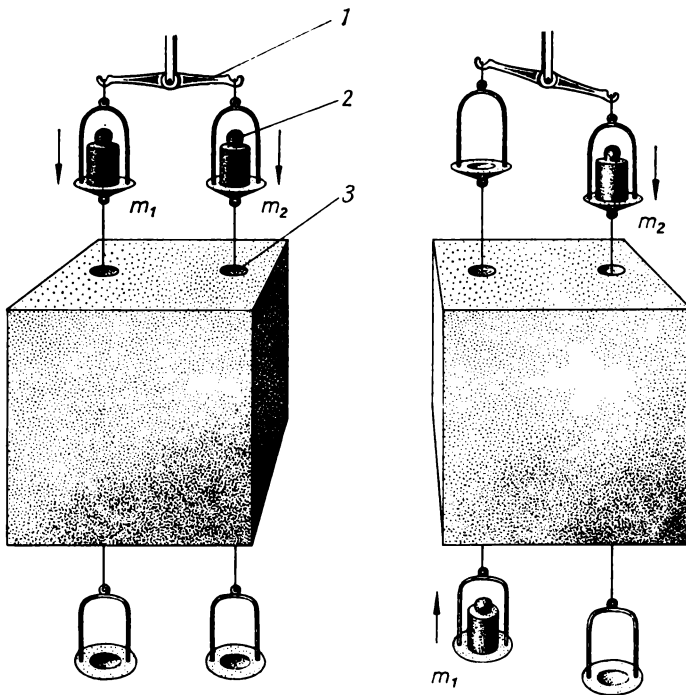
Newton hatte, umgekehrt vorgehend, einen Wert für die Gravitationskonstante ermittelt, indem er die aus Volumen und geschätzter Dichte errechnete Erdmasse in seine Formeln einsetzte. Obgleich das Ergebnis nur eine grobe Annäherung geben konnte, ließ es (was *Newton* schon früher ausgesprochen hatte) keinen Zweifel daran, daß die Anziehungskräfte selbst zwischen verhältnismäßig großen Massen nur sehr gering sind.

Das Instrument, solche Kräfte nachzuweisen und zu messen, stand erst 100 Jahre nach *Newton* in der Drehwaage zur Verfügung. Ursprünglich für die Messung elektrischer oder magnetischer Anziehungs- bzw. Abstoßungskräfte erdacht, wurde sie, entsprechend umgestaltet, 1798 von dem englischen Chemiker und Physiker *Henry Cavendish* (1731 bis 1810) zur Bestimmung der Gravitationskonstante (und daraus der mittleren Erddichte) benutzt.

Das Bild zeigt die prinzipielle Anordnung: An einem dünnen, elastischen Draht hängt ein leichter Waagebalken mit zwei kugelförmigen Endmassen m_1 und m_2 . Bereits sehr geringe Kräfte genügen, ihn zu drehen. Auf dem »Drehkreis« können außerdem zwei möglichst große, ebenfalls kugelförmige Massen M_1 und M_2 verschoben werden. Man stellt sie zunächst so, daß sie bei der Ruhelage des Waagebalkens möglichst weit von m_1 und m_2 entfernt sind. Nähert man sie daraufhin m_1 und m_2 , wird der Waagebalken aus seiner Ruhestellung gedreht, bis die bei der Drillung des Aufhängedrahtes wirkenden Kräfte den anziehenden Kräften zwischen m_1 und M_1 sowie m_2 und M_2 das Gleichgewicht halten. Die Auslenkung der Kugeln m_1 und m_2 , über Spiegel und Lichtzeiger beobachtet, ist daher ein Maß für die anziehenden Kräfte und führt mit Hilfe des Gravitationsgesetzes zur Gravitationskonstante.

Ein weiteres Verfahren, an dessen Durchführung unter anderen der deutsche Physiker *Franz Richarz* (1860 bis 1920) maßgebend beteiligt war, geht von der Balkenwaage aus. Befinden sich zwei Waagschalen mit aufgelegten Wägestücken m_1 und m_2 im Gleichgewicht, und nähert man einer Schale eine große Masse, wird dieses Gleichgewicht gestört. Daraus ist die Anziehungskraft feststellbar.

Zur Durchführung benutzte man einen Bleiklotz von mehreren Kubikmeter Inhalt und eine Waage mit vier Schalen, von denen zwei über, zwei unter dem Bleiklotz hingen. Die Waage war im Gleichgewicht, wenn gleiche Wägestücke auf den oberen oder den unteren Schalen lagen. Legte man hingegen ein Wägestück nach unten oder nach oben, wurde das Gleichgewicht gestört. Durch die Anziehungs-



Bestimmung der Gravitationskonstanten mit der Balkenwaage (Prinzip)

1 Waagebalken; 2 Wägestück; 3 durchbohrter Bleiklotz

kraft des Bleiklotzes wurde das Gewicht des unteren Wägestücks verringert, das des oberen vermehrt. Aus den zur erneuten Herbeiführung des Gleichgewichts nötigen Zusatzmassen war die Anziehungskraft und daraus wieder die Gravitationskonstante errechenbar.

Cavendish benutzte eine recht robuste Drehwaage mit einem Waagebalken von etwa 2 m Länge und »großen« Massen von jeweils mehr als 150 kg. Trotzdem erhielt er erst eindeutige Ergebnisse, als er die ganze Apparatur allseitig abschloß. Vorher hatten die stets vorhandenen, wenn auch noch so geringfügigen Luftbewegungen jede Messung ergebnislos werden lassen.

Moderne Drehwaagen sind so empfindlich, daß man mit Waagebalken von wenigen Zentimetern Länge und Massen von einigen Kilogramm auskommt. Der Waagebalken dreht sich häufig im Vakuum, die Massenpaare M_1 und m_1 sowie M_2 und m_2 werden unterschiedlich hoch angebracht, um Störungen des einen Massenpaares durch die Masse des anderen auszuschalten.

Neben ihrer Bedeutung zur Bestimmung der Gravitationskonstante (man gibt heute ihren Wert mit $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ an) erlangte die Drehwaage – unter Verzicht auf M_1 und M_2 – unmittelbare technische Bedeutung: Sie reagiert auch auf Änderungen des Schwerfeldes nach Größe und Richtung. Solche Änderungen aber zeigen sich zum Beispiel, wo Dichteunterschiede im Boden auftreten, das heißt etwa am Rande von Erzlagern, Ölfeldern usw. Für die Erkundung von Bodenschätzen haben sich daher Drehwaagen, automatisch arbeitend und teilweise auf Fahrzeugen montiert, als von unschätzbbarer Bedeutung erwiesen.

F

»Abscheu vor der Leere«

Für den Kundigen verknüpft sich der Begriff Vakuumtechnik mit Glühlampen, mit Elektronen- und Röntgenröhren, mit Verfahren zum Gewinnen und Verarbeiten hochschmelzender und reiner Werkstoffe, mit Destillation und Trocknung, Konservieren und Verpacken von Lebensmitteln und Arzneien, mit der Herstellung dünnster Schichten, wie sie zum Beispiel bei der Fertigung elektronischer Bauelemente und Baugruppen immer öfter benötigt werden, mit einer fast unübersehbaren Liste unterschiedlichster Pumpen und mit hundert anderen Dingen.

Wenig mehr als drei Jahrhunderte ist es erst her, seit man noch darum stritt, ob es ein Vakuum, einen luftleeren oder wenigstens beinahe luftleeren Raum, überhaupt geben könne. Zwei Geräte, die bei der Beantwortung dieser Frage halfen, benutzen wir noch heute, auch wenn wir mit Vakuumtechnik überhaupt nichts zu tun haben: Wir klopfen mißtrauisch an das Glas des Barometers (das damals allerdings ganz anders aussah als heute), wenn wir dem Wetterbericht oder dem Aussehen des Himmels nicht trauen, und wir greifen zur Luftpumpe, wenn der Druck in einem Reifen oder auch einer Luftmatratze nachgelassen hat.

Gibt es ein Vakuum, einen leeren Raum? Seit nahezu 2000 Jahren war diese Frage gestellt und über die möglichen Antworten gestritten worden.

»Nichts ist als Atome und leerer Raum« hatten im fünften Jahrhundert vor der Zeitrechnung *Leukipp* aus Milet (um 450 v. u. Z.) und *Demokrit* aus Abdera (um 460 bis um 370 v. u. Z.) und ihre Anhänger behauptet.

»Ein Vakuum ist unmöglich«, lehrte *Aristoteles* 100 Jahre später, und er begründete das aus den Bewegungsvorgängen in Luft zum Beispiel so:

»Die Luft leistet der Bewegung eines Körpers, etwa eines abgeschossenen Pfeils, Widerstand. Nimmt man die Luft weg, müßte der Körper entweder in Ruhe bleiben, denn worin sollte er sich bewegen, oder – wenn er sich bewegt, müßte er sich mit gleicher Geschwindigkeit immer weiter bewegen. Da das unsinnig ist, kann es kein Vakuum geben.«

Die materialistische Lehre *Demokrits* mit ihren »ewigen«, unzerstörbaren Atomen und dem »unendlichen«, leeren Raum war nicht nur den antiken Sklavenhaltern verdächtig, sondern später auch der christlichen Kirche. Die Lehren des *Aristoteles* hingegen ließen sich so auslegen, daß sie der Forderung, die Wissenschaft habe »Magd der Theologie« zu sein, dienten oder entgegenkamen. Der Fortschritt in der Wissenschaft wurde dadurch gehemmt; auf manchen Gebieten gab es für Jahrhunderte Stillstand.

Nicht einmal das kleinste Zugeständnis an neue (und damit von vornherein verdächtige) Ansichten war erlaubt – und so war auch der leere Raum unvorstellbar. Das Nichts widersprach der Allgegenwart Gottes. Die Natur, so sagte man später, hat einen »horror vacui«, einen »Abscheu vor der Leere«. Er mußte zur Erklärung vieler Erscheinungen herhalten.

Saugte man zum Beispiel an einem in eine Flüssigkeit getauchten Rohr, stieg diese in ihm entgegen ihrer Schwere in die Höhe. Der horror vacui lieferte eine plausible Erklärung: Die Natur ließ eben nicht zu, daß über dem Flüssigkeitsspiegel im Rohr ein leerer Raum entstand, und »schob« die Flüssigkeitssäule nach. Entsprechend erklärte man die Funktion von Heber und Saugpumpe.

Galilei gehörte auch diesmal wieder zu denjenigen, die eine erste Bresche in die Mauern alter Vorstellungen schlugen. Wir wissen (s. S. 13), daß er in seine Betrachtungen das Fallen im luftleeren Raum als idealen Grenzfall einbezog, die Möglichkeit des Vakuums also von vornherein bejahte. Doch er ging noch weiter und wies auf einen zwar längst bekannten, jedoch wenig beachteten Widerspruch hin:

»Warum«, so etwa fragte er, »kann eine Saugpumpe im Brunnenrohr nur eine Wassersäule von bestimmter Höhe, nämlich von 18 Ellen (etwa 10 m) heben? Würde das nicht bedeuten, daß die Größe des horror vacui begrenzt ist? Wäre es nicht viel einfacher, vor allem vernünftiger, an seiner Stelle eine Kraft anzunehmen, der durch eine Wassersäule entsprechender Länge das Gleichgewicht gehalten wird?«

Galilei kam nicht mehr dazu, seine Vermutung nachzuprüfen. Einer seiner Schüler, *Evangelista Torricelli* (1608 bis 1647), führte die entscheidenden Versuche aus.

Bei Saugpumpe und Brunnenrohr stellt sich das vermutete Gleichgewicht zwischen dem horror vacui und einer etwa 10 m langen Wassersäule ein. Mit einer derart langen Röhre zu experimentieren war sehr umständlich. Sollte nicht eine weit kürzere Röhre ausreichen, wenn man das spezifisch leichte Wasser durch das rund 13,5mal schwerere Quecksilber ersetzte?

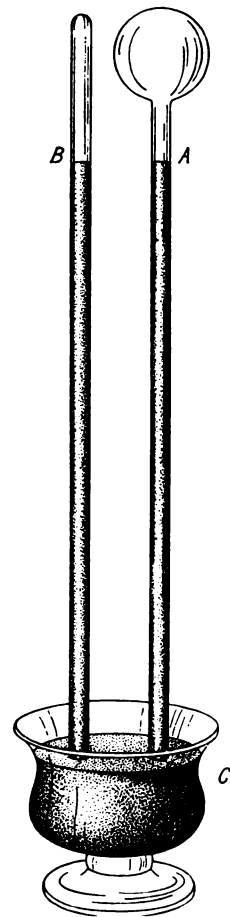
Torricelli nahm eine etwa 1 m lange Glasröhre, deren eines Ende zugeschmolzen war, füllte sie mit Quecksilber und tauchte sie in ein ebenfalls Quecksilber enthaltendes Gefäß, wobei er das offene Röhrenende zunächst verschloß. Sobald er die Öffnung freigab, sank die Quecksilbersäule im Rohr, und zwar soweit, daß der Abstand der beiden Flüssigkeitsspiegel etwa 76 cm betrug. Über dem oberen Quecksilberspiegel und dem Röhrenende hatte sich, daran bestand für *Torricelli* kein Zweifel, ein leerer Raum gebildet, die – wie man seitdem sagt – »Torricellische Leere« (wir wissen heute, daß dieser Raum in Wirklichkeit kein Vakuum ist, sondern unter anderem Quecksilberdampf niederen Drucks enthält).

Der horror vacui hielt also einer Quecksilbersäule von 1,5 Ellen, von 76 cm, das Gleichgewicht. Seine Größe stand damit fest . . .

Doch sehr bald mußte *Torricelli* sich korrigieren: Die Höhe der Quecksilbersäule war alles andere als konstant und veränderte sich oft schon im Verlauf weniger Stunden. *Torricelli* suchte lange, aber vergebens nach der vermeintlichen Fehlerquelle. Das Schwanken blieb.

Ein horror vacui, der einmal diesen, einmal jenen Wert annahm, war nicht denkbar. Aber welche Kraft konnte es sein, die von außen mehr oder weniger auf den

Torricellis Versuch: In beiden Röhren, die in dem mit Quecksilber gefüllten Gefäß C stehen, stellt sich ein gleich hoher Flüssigkeitsspiegel A, B ein



Quecksilberspiegel im Gefäß drückte und so die Flüssigkeitssäule steigen oder sinken ließ?

Kritisch überdachte der italienische Physiker alle Effekte, die man bisher dem horror vacui zugeschrieben hatte. Sein Resultat: Sämtliche hydraulischen und pneumatischen Erscheinungen waren ebenso und teilweise verständlicher zu deuten, wenn man den horror vacui durch das Gewicht der irdischen Lufthülle und den von diesem ausgeübten Druck ersetzte.

Die Schwankungen des Quecksilberbarometers – denn nichts anderes war im Grunde *Torricellis* Versuchsanordnung – erklärte er richtig aus Dichteänderungen der Luft. Sogar erste Schritte in das Gebiet der Meteorologie wagte er, indem er Luftströmungen und Winde als Ausgleichvorgänge zwischen Gebieten unterschiedlicher Luftdichte deutete, ausgehend von der Beobachtung, daß an »warmen Frühlingstagen die kühle, schwere Luft aus Kirchentüren ins warme Freie strömt und dabei einen fühlbaren Luftzug hervorruft«.

Die Entdeckung des Luftdrucks, den man seit Jahrhunderten zwar beobachtet, aber falsch gedeutet hatte, war die entscheidende Leistung *Evangelista Torricellis*.

Doch die Lehre vom horror vacui war so eingewurzelt, daß es weiterer Beweise bedurfte, sie endgültig zu widerlegen.

Daß nicht ein horror vacui *in* der Barometerröhre, sondern tatsächlich Druck von *außen* auf die Säule wirkte, demonstrierten Forscher, die sich in Florenz in der Experimentier- und Forschungsgemeinschaft »Accademia del cimento« zusammengefunden hatten. Sie ersetzten das offene Gefäß *Torricellis* durch ein geschlossenes mit einem seitlichen Ansatz und luftdicht durch den Deckel führender »Barometer-röhre«. Blieb dieser Ansatz geschlossen, fehlten die von *Torricelli* beobachteten Schwankungen, der äußere Luftdruck konnte nicht auf die Quecksilberoberfläche wirken. Öffnete man den Ansatz, kehrten die Schwankungen wieder.

Noch überzeugender waren Experimente, die der französische Mathematiker und Physiker *Blaise Pascal* (1623 bis 1662) anregte. Er schrieb seinem Schwager:

»Ich habe nun einen Versuch ausgedacht, der genau ausgeführt allein genügen würde, diese Frage (d. h. Luftdruck oder horror vacui – Anmerkung des Autors) zu entscheiden. Der Versuch würde darin bestehen, das Vakuum in der bekannten Weise mehrere Male an einem Tage in derselben Röhre und mit demselben Quecksilber hervorzurufen, das eine Mal am Fuße, das andere Mal auf dem Gipfel eines Berges . . ., um zu prüfen, ob die Höhe des Quecksilbers in beiden Fällen die gleiche oder verschieden ist.

. . . Wäre nämlich die Quecksilbersäule auf dem Gipfel kürzer als am Fuße des Berges, so würde daraus notwendig folgen, daß einzig und allein der Luftdruck das Quecksilber in der Schwebe hält, und nicht ein horror vacui. Es ist nämlich leicht ersichtlich, daß am Fuße des Berges eine größere Luftmenge einen Druck ausübt als auf dem Gipfel, während kein Grund zu der Annahme vorliegt, daß die Natur in der unteren Region einen größeren Abscheu vor der Leere empfinden sollte als in der oberen . . .«

Pascals Schwager führte den Versuch aus. Er stellte zwei völlig gleiche Barometer her und bestieg mit einem davon einen rund 1000 m hohen Berg, während das zweite am Fuße zurückgelassen und ständig beobachtet wurde. Das erwartete Ergebnis trat ein, zwischen Tal und Gipfel wurde ein Luftdruckunterschied von über drei Zoll Quecksilbersäule gemessen. Während des Abstiegs wurde die Messung an mehreren Orten wiederholt, es zeigte sich, daß der Luftdruckunterschied mit abnehmender Höhendifferenz sank.

Pascals Schwager erweiterte die Versuche noch:

»Am folgenden Tage wurde mir von einer Seite der Vorschlag gemacht, meinen Versuch am Fuße und auf der Spitze des höchsten Turmes in Clermont zu wiederholen und zu erproben, ob in diesem Falle ein Unterschied bemerkbar sei. Um der Wißbegierde zu genügen, stellte ich noch am selben Tage das Experiment in einem Hause an, das sich am Fuße des Turmes befand. Wir fanden dort die Höhe der Quecksilbersäule gleich 26 Zoll 3 Linien (1 Zoll = 25,4 mm, 1 Linie = $\frac{1}{12}$ Zoll = 2,2558 mm). Darauf wiederholte ich den Versuch auf der Spitze des Turmes. Dort betrug die Höhe des Quecksilbers 26 Zoll 1 Linie, war also um 2 Linien geringer.«

Eines eindringlicheren Beweises bedurfte es nicht *für* den Luftdruck und *gegen* den horror vacui, und *Pascal* erkannte bereits eine Anwendungsmöglichkeit: die Benutzung des Quecksilberbarometers für Höhenmessungen.

Wenige Jahre nach den Experimenten von *Torricelli*, *Pascal* und anderen und ohne von diesen zunächst zu wissen, trat in Magdeburg *Otto von Guericke* (1602 bis 1686) mit seinen Versuchen über den »leeren Raum« an die Öffentlichkeit.

Guericke, einer begüterten Patrizierfamilie entstammend, war kein Naturwissenschaftler von Profession, sondern »Amateur«. Er studierte, da er für die »Ratsherrenlaufbahn« vorgesehen war, in Leipzig, Helmstedt und Jena zunächst Jura. Um den Festungsbau kennenzulernen, setzte er seine Studien im niederländischen Leiden fort und erwarb umfangreiche naturwissenschaftliche und technische Kenntnisse, die er bei Studienreisen nach England und Frankreich noch ergänzte.

1626 kehrte er nach Magdeburg zurück. Während seiner Tätigkeit als Ratsherr und später (1646) Bürgermeister erwies er sich als geschickter, zielstrebiges Kommunalpolitiker, der seine Vaterstadt in den schwierigen Verhandlungen während und nach dem Dreißigjährigen Krieg vertrat.

Seine technischen Kenntnisse kamen *Guericke* ebenfalls zugute: Als Magdeburg 1631 durch *Tillys* Truppen gestürmt und zum großen Teil zerstört worden war, setzte er sich mit allen Kräften für den Wiederaufbau seiner Heimatstadt ein. Dabei entwickelte er, weit vorausschauend, Pläne, die uns heute noch Bewunderung abnötigen und teilweise sogar in den Wiederaufbau Magdeburgs nach dem zweiten Weltkrieg einbezogen wurden.

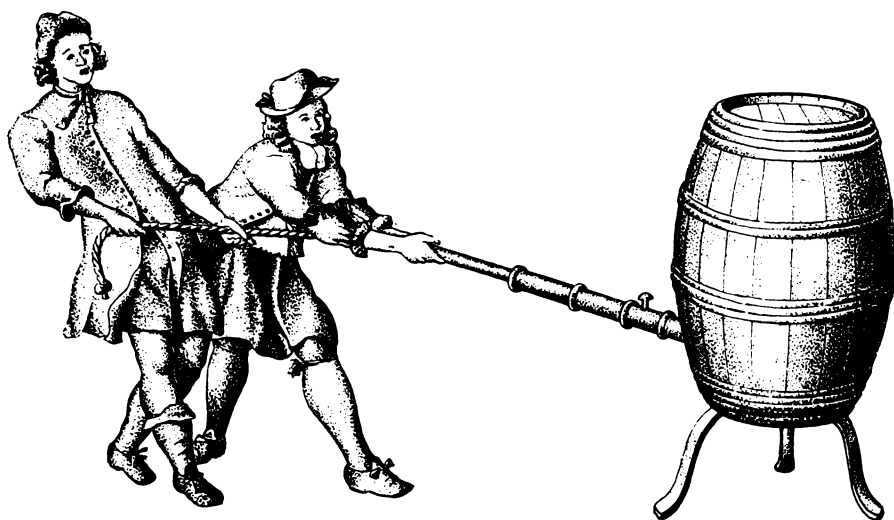
Wahrscheinlich erst um 1650 – genauere Angaben darüber fehlen – beginnt *Guericke* mit physikalischen Experimenten. Auch er knüpft an die seit *Aristoteles* verbreitete und gelehrte Ansicht an, eine »Leere« sei nicht denkbar, gleich, ob es sich um begrenzte Räume auf der Erde oder um die unermesslichen Weiten zwischen den Himmelskörpern handle. Gerade dies erregte *Guerickes* Widerspruch:

»Weil aber schon seit alters her die Gelehrten sich so leidenschaftlich über das Vakuum, ob es nämlich vorhanden oder nicht vorhanden wäre, und was es denn sei, gestritten haben, wurde dadurch ein so glühendes Verlangen in meinem Inneren entfacht, die Wahrheit über eine so umstrittene Frage zu erkunden, daß es weder betäubt noch gelöscht werden konnte, ich hätte denn bei einiger Muße ehestens einen Versuch darüber ins Werk gesetzt.«

Wie aber soll dieser Versuch aussehen? *Guerickes* Konzeption ist an Einfachheit kaum zu überbieten: Wenn ich – so überlegt er – einen Körper aus dem Raum entferne und dafür Sorge, daß an dessen Stelle kein anderer Stoff treten kann, muß ein leerer Raum entstehen.

Die Verwirklichung dieses Gedankens erwies sich jedoch als weitaus schwieriger, als *Guericke* vorausgesehen hatte. Das lag nicht zuletzt an seiner Versuchsanordnung. Hilfsmittel, die heute in jedem Unterrichtskabinett zu finden sind (und sei es nur eine Gummidichtung), waren noch unbekannt oder mußten nach Angaben des Experimentierenden von Handwerkern angefertigt werden nach Vorbildern, die meistens Gerätschaften des täglichen Lebens entlehnt waren. Auch *Guericke* verfuhr so.

An der unteren Seite eines sorgfältig abgedichteten Holzfasses ließ er eine Handfeuerspritze so anbringen, daß mit ihrer Hilfe das Wasser aus dem vorher gefüllten Faß herausgezogen werden konnte. Der Versuch mißlang. Der Pumpenkolben (der, was *Guericke* noch nicht wußte, vom äußeren Luftdruck festgehalten wurde) ließ sich nicht bewegen. Statt dessen riß die Befestigung der Pumpe aus.



Guerickes Versuch, ein Faß zu evakuieren

»Nachdem Abhilfe durch Anbringen stärkerer Schrauben getroffen worden war, vermochten endlich drei starke Männer, die an dem Stempel der Spritze zogen, das nachfolgende Wasser ... herauszuschaffen. Dabei wurde aber in allen Teilen des Fasses ein Geräusch gehört, wie wenn das Wasser heftig kocht, und dies dauerte so lange, bis das Faß an Stelle des herausgezogenen Wassers mit Luft gefüllt war ...«

Dieser Mißerfolg, offensichtlich durch mangelnde Abdichtung des Fasses hervorgerufen, entmutigte *Guericke* jedoch keineswegs. Er setzte nunmehr das Versuchsfäß in ein größeres, das er mit Wasser füllte. Damit war, so meinte er, der Luft die Zufuhr durch undichte Stellen verwehrt.

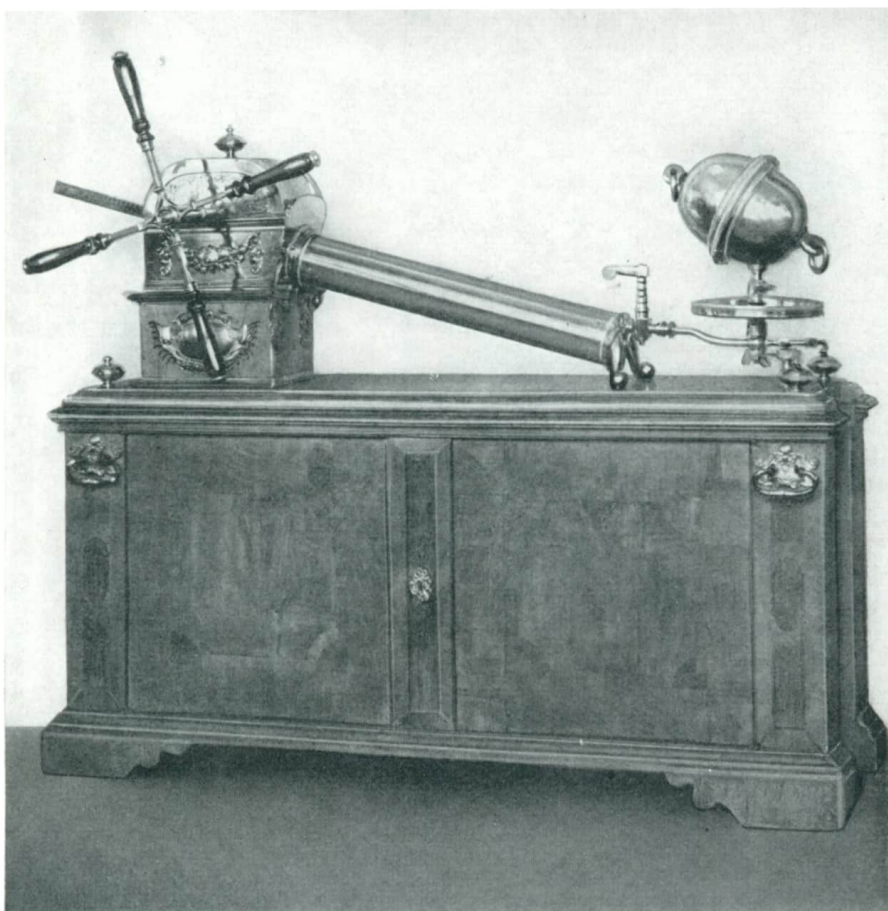
»... Jetzt gelang es, aus dem kleineren Fasse das Wasser herauszuschaffen, an dessen Stelle ohne Zweifel ein leerer Raum zurückblieb.

Als aber nach Ablauf des Tages mit der Arbeit aufgehört wurde und alles ringsum ruhig geworden war, vernahm man einen wechselnden, von Zeit zu Zeit unterbrochenen Ton, ähnlich dem eines zwitschernden Singvogels. Dies dauerte fast drei volle Tage.

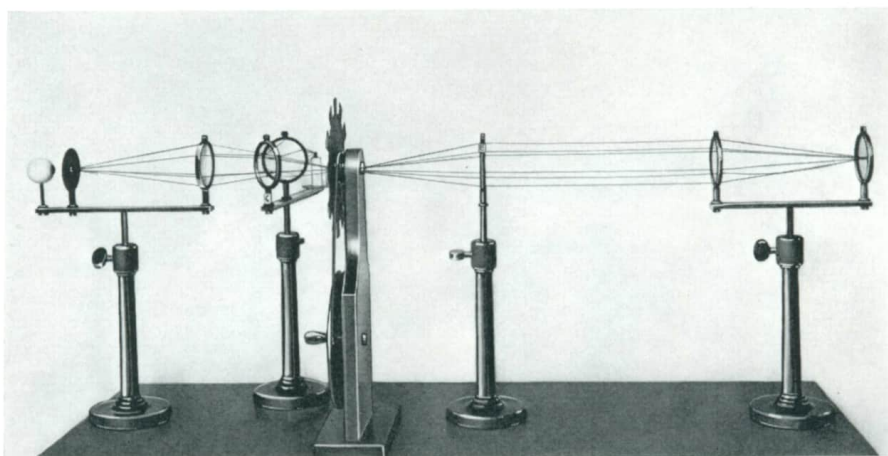
Als darauf die Mündung des kleineren Fasses geöffnet wurde, fand man es zum großen Teil mit Luft und Wasser gefüllt. Es war aber nichtsdestoweniger ein Teil leer, da während des Öffnens etwas Luft eindrang.

Alle waren von Erstaunen darüber ergriffen, daß das Wasser in ein Faß gelangte, das so sorgfältig an allen Stellen verpicht und verstopft war. Ich ersah endlich aus wiederholten Versuchen, daß das unter starkem Druck befindliche Wasser durch das Holz hindurchging ...«

Demnach genügte auch die Kombination Holz/abdichtendes Wasser noch nicht. *Guericke* ließ sich eine Kugel aus Kupferblech anfertigen, mit Hahn und Pumpen-

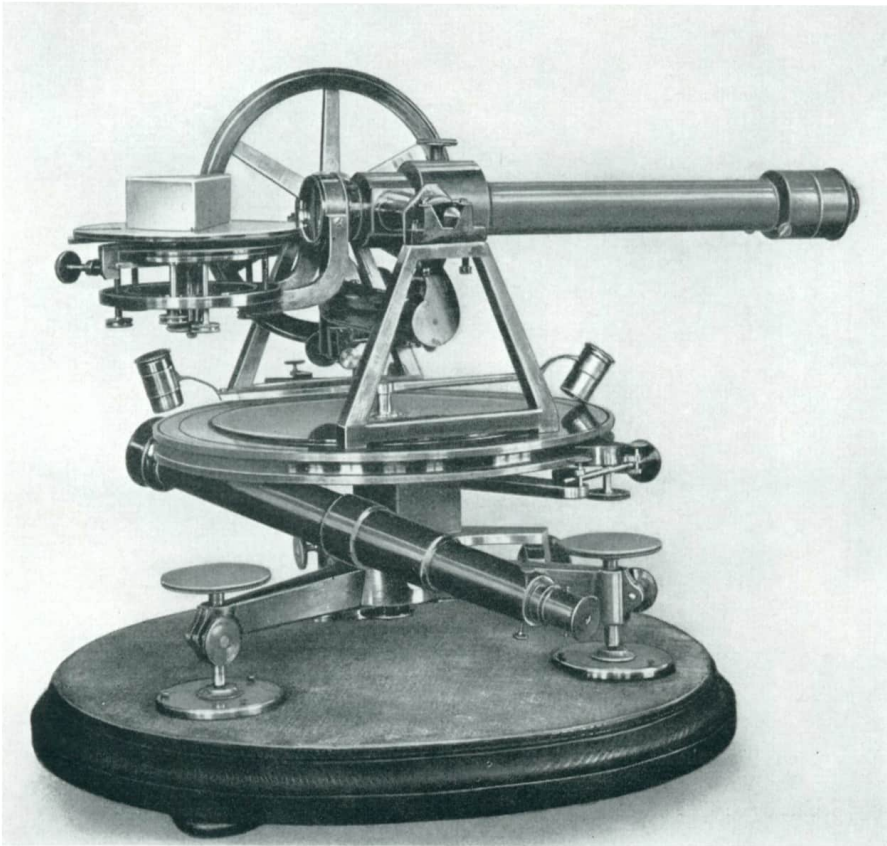


Luftpumpe von Jakob Leupold
(1709). Foto: Staatl. Math.-Phys.
Salon Dresden



Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit
nach der Zahnradmethode Fizeaus.
Foto: Deutsches Museum München

Prismen-Spektralapparat von
J. v. Fraunhofer, mit dem die Fraun-
hoferschen Linien ausgemessen wur-
den (um 1815). Foto: Deutsches
Museum München





Apparat von Fraunhofer zur Beobachtung der Beugungserscheinungen (um 1820). Foto: Deutsches Museum München

ansatz, und wiederholte die Versuche. Anfänglich ging alles gut, obwohl sich die den Kolben ziehenden Männer erheblich anstrengen mußten. Dann scheiterte auch dieser Versuch.

»Während sie noch mit dem Ein- und Ausziehen des Stempels beschäftigt waren und schon glaubten, es sei nahezu alle Luft herausgeschafft, wurde die Metallkugel plötzlich mit lautem Knall und zu aller Schrecken so zerdrückt, wie man ein Tuch zwischen den Fingern zusammenballt, oder als ob die Kugel von der äußersten Spitze eines Turmes mit heftigem Aufprall herabgeworfen worden wäre.«

Guericke glaubte zunächst, die Kugel habe an einer unbemerkt gebliebenen, abgeplatteten Stelle der umgebenden Luft nicht standhalten können. Er achtete daher sorgfältig darauf, daß eine zweite Kugel, aus dickerem Blech, sehr genau gearbeitet wurde. Mit ihr hatte *Guericke* Erfolg:

»Als Beweis aber, daß die Kugel vollständig evakuiert sei, diente der Umstand, daß ein Entweichen von Luft aus dem . . . Ventil der Spritze endlich nicht mehr stattfand. So wurde also zum zweiten Male ein leerer Raum erhalten.«

Als *Guericke* den Hahn an der Kugel öffnete, »drang die Luft mit solcher Kraft in die Kugel, als wollte sie einen davorstehenden Menschen gleichsam an sich reißen«.

Die Frage, mit der sich Jahre zuvor *Torricelli* auseinanderzusetzen hatte, stellte sich nun auch *Guericke*: Woher rührte die gewaltige Kraft, die Wasser durch Holz drücken, eine Kupferkugel zusammenquetschen, Luft mit solcher Gewalt in die entleerte Kugel stürzen lassen konnte?

Nur weitere Versuche konnten diese Frage klären. Wenn nur das Evakuieren der Versuchsgefäße nicht so umständlich gewesen wäre!

Bei den meisten Experimenten hatte *Guericke*, wie er sich eingestand, eigentlich Wasser gepumpt – der luftleere Raum war nur nebenher entstanden. Nur bei den anfänglich mißglückten Versuchen mit der Kupferblechkugel hatte die zum Pumpen hergerichtete Handspritze unmittelbar Luft angesaugt.

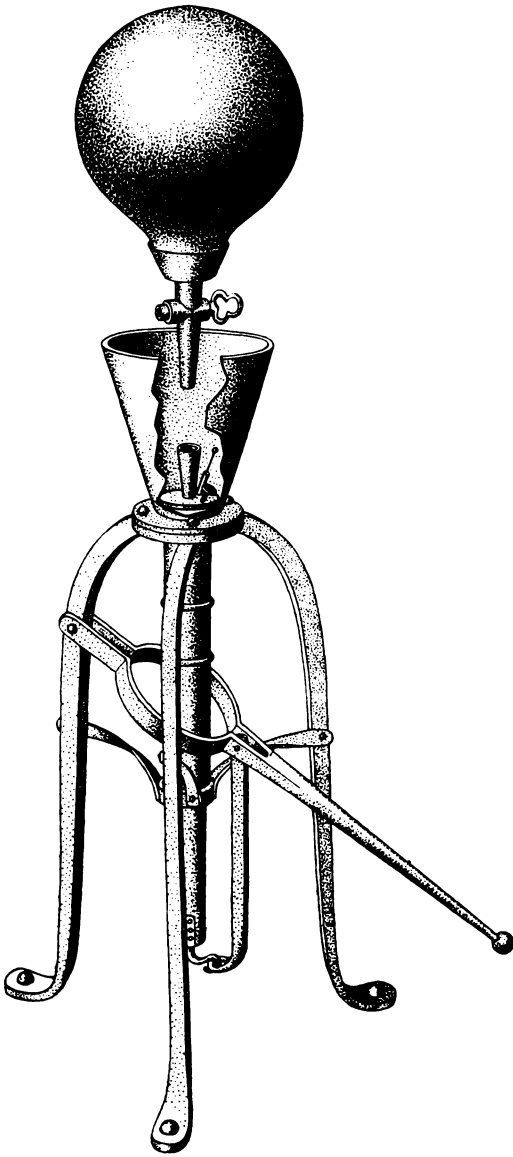
Luft hatte jedoch dem Wasser eins voraus: ein Ausdehnungsbestreben, das sie jeden verfügbaren Raum ausfüllen ließ, auch wenn sie sich dabei noch so sehr verdünnte.

Das sollte sich zum Bau einer einfach zu handhabenden *Luftpumpe* ausnutzen lassen!

Verband man einen Pumpenstiefel mit dem zu entleerenden Raum, strömte aus diesem beim Zurückziehen des Kolbens Luft nach. Trennte man die Verbindung Gefäß – Pumpenstiefel, drückte den Kolben zurück und trieb dabei die in den Stiefel gedrungene Luft aus, war der Anfangszustand wiederhergestellt. Der Vorgang konnte wiederholt und so die Luft portionsweise aus dem zu evakuierenden Gefäß entfernt werden.

Guericke baute seine Luftpumpe, die erste echte Luftpumpe, in mehreren Ausführungen. Eine davon (sie stammt wahrscheinlich aus dem Jahre 1662) zeigt unser Bild.

Der Pumpenstiefel ist senkrecht in einem am Boden befestigten Dreifuß angebracht, während der Kolben mit Hilfe eines kraftsparenden Hebels betätigt wird. Der Deckel des Stiefels trägt das Anschlußrohr zur Verbindung zwischen Luftpumpe und Versuchsgefäß. Außerdem enthält er zwei Ventile. Das eine öffnet sich



Eine Luftpumpe Guericke's

bei der Abwärtsbewegung des Kolbens, das heißt, wenn Luft aus dem zu entleerenden Gefäß in den Stiefel übertritt, und schließt sich bei der Aufwärtsbewegung des Kolbens. Das andere verbindet den Kolben mit der Außenwelt. Es ist bei der Abwärtsbewegung des Kolbens geschlossen, öffnet sich bei der Aufwärtsbewegung und läßt die im Stiefel enthaltene Luft entweichen. Dem zusätzlichen Abdichten der Pumpe dienen die beiden trichterähnlichen, wassergefüllten Gefäße. Mit diesen Pumpen konnte *Guericke* eine Kugel von einem halben Meter Durchmesser innerhalb einer Stunde bis auf einen Druck von etwa 2700 Pa evakuieren (moderne Hochleistungspumpen brauchen dazu keine Minute!).

Niedrigere Werte erreichte er nicht. Ursache hierfür war vor allem, daß bereits bei normalen Temperaturen das Dichtungswasser auch in dem zu evakuierenden Behälter verdampft. Zum anderen wird mit zunehmender Verdünnung die Luftmenge, die bei einem Kolbenhub entfernt wird, immer geringer; schließlich kann durch aufeinanderfolgende Kolbenbewegungen nicht mehr Luft entfernt werden, als durch störende Nebeneffekte nachdringt.

Es ist nachzutragen, daß die Guericquesche Luftpumpe zwar später wesentlich verbessert wurde (zum Beispiel mehrstiefelige Ausführungen, Ersetzen der Wasserdichtung durch Öl- oder Fettdichtungen, die wegen ihres niedrigen Dampfdrucks ein höheres Vakuum herzustellen ermöglichten, exaktere Ausführungen der Kolben, Ventile und Hähne), im Prinzip aber nahezu 200 Jahre unverändert blieb, ehe sie von Pumpen abgelöst wurde, die nach anderen Prinzipien arbeiteten.

Für *Otto von Guericke* reichte das erzielte »Vakuum«. Es eröffneten sich zahlreiche Versuchsmöglichkeiten, deren Resultate man, als die Metallkugeln durch gläserne Rezipienten ersetzt wurden, auch unmittelbar beobachten konnte.

Was dabei stets überraschte, war die Heftigkeit, mit der die Erscheinungen auftraten: Glasgefäße, die auch nur den kleinsten Fehler, die geringste innere Spannung aufwiesen, wurden beim Evakuieren explosionsartig zersplittert (eine Erscheinung, die auch heute noch als Implosion gefürchtet ist). Tauchte man einen evakuierten Rezipienten in Wasser und öffnete man den Hahn, schoß das Wasser mit solcher Gewalt in das Innere, daß dies oft das Ende des Rezipienten bedeutete.

Abscheu der Natur vor der Leere? Auch dem unvoreingenommenen Beobachter und Experimentator *Guericke* schienen solche Ergebnisse weit eher auf eine äußere Kraft als auf den horror vacui hinzudeuten. Diese äußere Kraft aber konnte nur die allgegenwärtige Luft durch ihr Gewicht beziehungsweise durch ihren Druck abgeben.

Den Nachweis des Luftdrucks – und damit zugleich den Beweis, daß die Vorstellung vom horror vacui nicht richtig sein konnte, lieferte *Guericke* auf verschiedene Weise. Eine Methode ähnelt derjenigen *Torricellis* und unterscheidet sich von ihr lediglich in der Ausführung.

Das in einen entleerten Rezipienten strömende Wasser mußte auf die Frage führen, bis zu welcher Höhe Wasser in einer mit dem Rezipienten verbundenen Röhre steigen könnte. Versuche im Zimmer ergaben, daß das Wasser in Deckenhöhe gelangte. *Guericke* brachte eine Röhre, deren unteres Ende in Wasser tauchte, an der Außenwand seines Hauses an. Solange das Oberende und der Rezipient im 1., 2. oder 3. Stock lagen, gelangte noch Wasser in den Rezipienten. Erst den vierten Stock erreichte die Wassersäule nicht mehr; sie blieb darunter in der Röhre stehen. *Guericke* wiederholte seinen Versuch immer wieder und kam auf die gleiche Entdeckung wie *Torricelli*:

»Obschon ich nichts unterließ, diesen Versuch noch verschiedene Male in der gleichen Weise zu wiederholen und nachzumessen, sah ich dennoch das Wasser immer dieselbe Höhe innehalten. Als aber dieser Versuch einige Tage unterbrochen wurde, nahm ich auch von einem zum anderen Tage eine gewisse Veränderung wahr. Mitunter nämlich stand das Wasser eine, zwei oder drei Handbreit höher, bisweilen um so viel tiefer.

Aus dieser Erscheinung, die sich mir unerwartet darbot, konnte ich nichts anderes schließen, als daß der sogenannte Abscheu vor dem leeren Raum in dem Druck der atmosphärischen Luft besteht, welche das Wasser, wo sich ein leerer Raum bietet, dazu drängt, in diesen hineinzutreten und ihn einzunehmen, und zwar bis zu einer Höhe, welche diesem Drucke entspricht.

Wenn nämlich das Emporsteigen infolge des Abscheus vor dem leeren Raum geschähe, so müßte das Wasser entweder bis zu beliebiger Höhe unbegrenzt dem Vakuum folgen oder immer in ein und derselben Höhe stehenbleiben. Daß aber die Höhe sich ändert, ist das sicherste Anzeichen dafür, daß nicht nur das Emporsteigen des Wassers, sondern auch seine Schwankungen von einer äußeren Ursache herrühren.

Die Höhe des Wassers in der Röhre hängt daher nicht von dem Abscheu der Natur vor dem leeren Raume, sondern von dem Gleichgewicht zwischen der Wassersäule und dem Luftdruck ab.«

Auch *Guericke* blieb der Zusammenhang zwischen Luftdruck und meteorologischen Erscheinungen nicht verborgen. Um die Änderungen des Wassersäulenstandes deutlich beobachten zu können, ließ er eine Holzfigur als »Wettermännchen« im Wasser der Röhre schwimmen. Der ausgestreckte Finger wies auf eine Skale.

»Ich habe mit Bestimmtheit, als im vergangenen Jahre jener ungeheure Sturm stattfand, auf Grund des soeben erwähnten Versuchs eine besondere, außerordentliche Veränderung der Luft wahrgenommen. Die Luft war so leicht, im Vergleich zu sonst, daß der Finger des Männchens sogar unter den äußersten an der Glasröhre angebrachten Punkt herabstieg. Als ich dies sah, teilte ich den Umstehenden mit, es sei ohne Zweifel irgendwo ein großes Unwetter ausgebrochen. Und kaum waren zwei Stunden verflossen, als jener Orkan auch in unsere Gegend einbrach, wenn er auch nicht so heftig auftrat als auf dem Meere.«

So also lautete eine Sturmwarnung im 17. Jahrhundert!

Guericke experimentierte weiter:

Eine luftgefüllte Blase, im Inneren eines gläsernen Rezipienten untergebracht, ist erst schlaff, dehnt sich aus, wird straff und platzt schließlich, je mehr der Rezipient evakuiert wird.

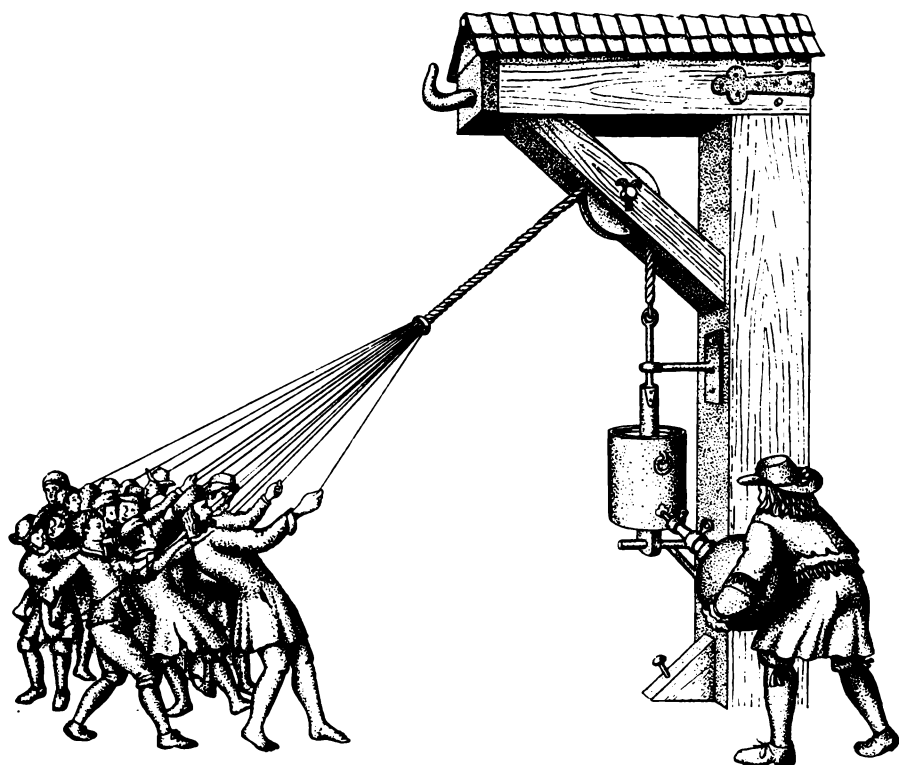
Das Platzen war nicht oder kaum zu hören. Das wurde ein weiterer Anlaß für Versuche, deren Ergebnis lautete: Schall braucht Luft, um sich im Raum auszubreiten, andernfalls kann er nur durch Körper fortgepflanzt werden.

Luft ist elastisch – elastischer als jede Feder, denn die Elastizität der Luft läßt im Laufe der Zeit nicht nach: eine weitere wichtige Feststellung *Guerickes*, die in der Technik heute vielfältig genutzt wird.

Irdisches Leben kann im luftleeren Raum nicht existieren, Luft ist ein unentbehrliches Lebenselement. Versuche des Magdeburger Bürgermeisters erwiesen es einmal mehr.

Eine Flamme kommt nicht ohne Luft aus; sie verändert ihre Form, verlischt nach kurzer Zeit, obwohl, wie *Guericke* betont, noch nicht die »ganze Luft« im Versuchsgefäß verbraucht ist, sondern nur ein geringer Teil (*Guerickes* Nachfolger ermittelten daraus die Zusammensetzung der Luft).

Guericke bemerkt, daß Flüssigkeiten stets »Luft« abgeben und so das Vakuum »verschlechtern«. Er stellte fest, daß sich in dieser Hinsicht »abgestandenes« Wasser



Guericke demonstriert die von der Lufthülle ausgeübte Kraft

besser verhält als frisches und daß sogar aus festen Körpern »Luft ausdünstet« – alles Erscheinungen, die auch Vakuumtechnikern des 20. Jahrhunderts bekannt und oft unerwünscht sind.

Um das Gewicht der Luft festzustellen, wägt *Guericke* den gleichen Behälter erst mit Luftfüllung, dann evakuiert. Aus der Gewichts Differenz errechnet er nicht nur das Gewicht der eingeschlossenen Luftmenge, sondern beobachtet auch, daß die entleerte Kugel in Abhängigkeit vom äußeren Luftdruck einen zeitlich schwankenden Auftrieb erfährt.

Immer wieder überrascht ihn, welche Kraft der Luftdruck bereits auf kleine Flächen ausübt. Das Gewicht der Wassersäule, dem die Kraft des Luftdrucks die Waage hält, gibt *Guericke* die Möglichkeit, die Kraft auf beliebige Flächen zu berechnen. Sie ist in der Tat erstaunlich, viel größer, als er ursprünglich angenommen hatte.

Guericke zögert denn auch nicht, dieses staunenswerte Resultat durch die Demonstrationsversuche zu veranschaulichen, die ihn besonders bekannt machten:

An einem galgenähnlichen Gestell befestigte er einen Zylinder, in den ein Kolben luftdicht und zugleich beweglich eingepaßt war. Am Kolben wurde ein über eine

Rolle laufendes Seil befestigt, das in 40 oder 50 Enden auslief. Der Kolben konnte von ebensovielen »Interessierten« hochgezogen werden. Das bereitete keinerlei Schwierigkeiten, solange ein Hahn am Unterende des Zylinders geöffnet war und ungehindert Luft nachströmen konnte. Wurde aber der Hahn geschlossen, mit einem evakuierten Gefäß verbunden und dann wieder geöffnet, bewegte sich der Kolben unter der Einwirkung des Luftdrucks mit solcher Gewalt nach unten, daß er die Männer an den Seilenden mitriß.

Selten fehlt in einem Werk, das sich mit der Geschichte der Physik befaßt, eine Abbildung des berühmtesten Guerickeschen Versuchs, die Vorführung der »Magdeburger Halbkugeln«:

»Ich ließ zwei Halbkugeln aus Kupfer, von ungefähr $\frac{2}{3}$ Ellen Durchmesser, herrichten. Die Halbkugeln paßten gut aufeinander. Auch war die eine mit einem Ventil versehen, mit dessen Hilfe die im Inneren befindliche Luft herausgezogen werden konnte. Die Schalen waren außerdem mit eisernen Ringen verbunden, damit Pferde daran gespannt werden konnten. Ferner ließ ich einen Ring aus Leder zusammennähen, der gut mit Wachs (gemischt mit Terpentinöl) durchtränkt wurde, so daß er keine Luft durchließ.

Diese Schalen habe ich, nachdem jener Ring dazwischen gebracht war, aufeinander gelegt und daraus die Luft schnell herausgepumpt. Ich sah, mit welcher Kraft die beiden Schalen, zwischen denen sich jener Ring befand, vereinigt wurden. Von dem Druck der äußeren Luft zusammengepreßt, waren sie so fest verbunden, daß sechzehn Pferde sie nicht oder nur mit Mühe voneinander reißen konnten. Gelang es endlich mit Aufbringung aller Kraft, sie zu trennen, so verursachte dies ein Geräusch wie ein Büchenschuß.

Sobald aber durch Öffnen des Hahnes der Luft Zutritt gegeben wurde, konnten sie schon mit den Händen getrennt . . . werden.«

Nun, so spektakulär diese Vorführungen waren (im kleinen zeigt sie uns jedes verschlossene und zu öffnende Einweckglas), bilden sie doch nur einen Teil der Arbeiten des Magdeburger Amateurphysikers. Sieben Bände umfaßt sein Hauptwerk, die »Experimenta nova, ut vocantur Magdeburgica de vacuo spatio«, die »Magdeburgischen neuen Versuche über den leeren Raum«. Es erschien 1672, neun Jahre nach Abschluß des Manuskripts, in Holland (allerdings hatten bereits vorher andere Autoren über *Guerickes* Arbeiten berichtet). Das Werk bestätigt die gewaltige Leistung *Otto von Guerickes*, deren Ergebnis sich mit seinen eigenen Worten so zusammenfassen läßt:

»Die Luft ist ein körperliches Etwas. Die Wärme dehnt sie aus, die Kälte verdichtet sie. Die Luft läßt sich zusammendrücken, und sie läßt sich verdünnen. Doch haben Verdichtung und Verdünnung Grenzen. Die Luft hat Gewicht und drückt sich selbst. Sie drückt auf alles. Nur wird das von uns Menschen nicht bemerkt, weil wir in der Luft selbst leben, sie uns von allen Seiten gleichmäßig und sich das Gleichgewicht haltend umgibt und zugleich durchdringt.«

R

Schnell wie das Licht

und 300 000 km, mehr als drei Viertel der Entfernung Erde – Mond, durchheilen Lichtwellen in jeder Sekunde im luftleeren und auch im luftgefüllten Raum. Die Lichtgeschwindigkeit zählt zu den wichtigsten Naturkonstanten. Kein Körper kann sie erreichen oder gar überschreiten, kein Signal schneller übertragen werden, keine Energie sich mit höherer Geschwindigkeit ausbreiten.

Dem Physiker begegnet die Lichtgeschwindigkeit in zahlreichen Formeln, bei vielen Experimenten – auf dem Gebiet der Optik ebenso wie in der Elektrizitätslehre, in der Kernphysik ebenso wie in der Relativitätstheorie oder der Wellenmechanik.

Als Ausbreitungsgeschwindigkeit *aller* elektromagnetischen Wellen beherrscht sie das Gebiet der Informations- und Nachrichtentechnik vom Rundfunk bis zum Radar, von der Funknavigation bis zur Nachrichtenverbindung über kosmische Distanzen.

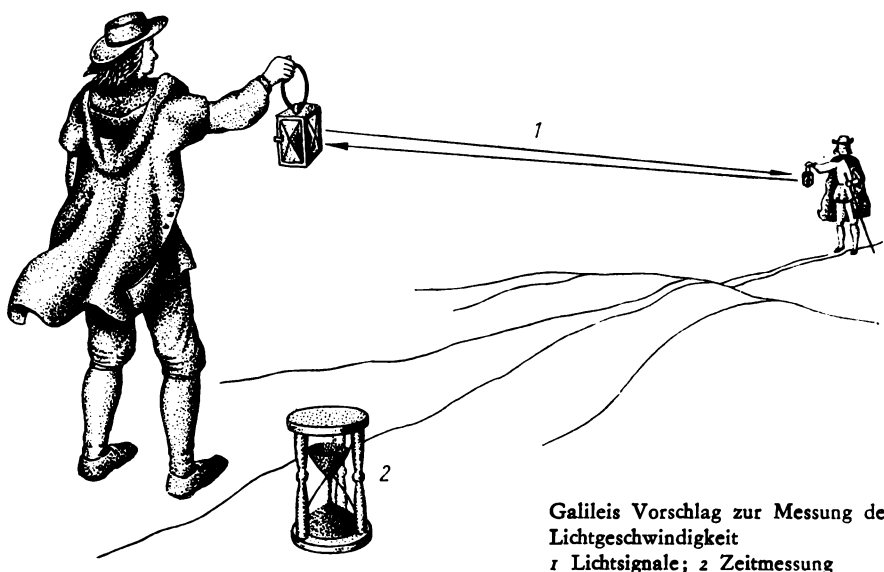
Daher müssen Wissenschaftler und Techniker die Lichtgeschwindigkeit genau kennen. Der Wert 300 000 km/s genügt sehr oft; er ist zu »groß« für Präzisionsmessungen und -berechnungen. Über Jahrhunderte erstrecken sich die Bemühungen, ihn immer exakter zu bestimmen.

Wie weit von uns ein Blitz aufzuckt, ist leicht abzuschätzen. Wir brauchen lediglich die Zahl der Sekunden zwischen seinem Aufleuchten und dem Donner durch drei zu teilen, denn etwa drei Sekunden benötigt der Schall in Luft, um einen Kilometer zurückzulegen. Stillschweigende Voraussetzung dabei ist, daß Licht bis zu uns »keine Zeit braucht«, daß wir den Blitz wirklich und im strengen Sinne des Wortes unverzüglich sehen. Wir dürfen das voraussetzen; denn Licht ist rund millionenfach schneller als Schall.

Diese fast unvorstellbare Geschwindigkeit erklärt, daß Jahrhunderte umstritten blieb, ob Licht überhaupt Zeit benötigt, sich auszubreiten. Noch als man längst gelernt hatte, Lichtstrahlen mit Lupen, Spiegeln und Prismen bestimmte Wege vorzuschreiben, standen einander zwei Ansichten gegenüber:

Licht ist unendlich schnell, sagten die einen. Wir sehen eine Lampe im gleichen Augenblick leuchten, da ihre Blende geöffnet wird.

Licht braucht Zeit, sich auszubreiten, meinten andere, unter ihnen *Galilei*. Die Geschwindigkeit ist zwar, verglichen mit bekannten Geschwindigkeiten, beinahe unbegreiflich, aber sie ist nicht *unendlich* groß. Wir sehen deshalb eine Sternschnuppe noch einen Augenblick nach ihrem Verlöschen.



Galileis Vorschlag zur Messung der
Lichtgeschwindigkeit
1 Lichtsignale; 2 Zeitmessung

Wer hatte recht? Diese Frage konnte nicht durch spitzfindige Dispute, sondern allein durch Experimente und Messungen entschieden werden. In seinen »Discorsi...« – wir kennen sie bereits (s. S. 9) – schlägt *Galilei* eine Möglichkeit vor:

Zwei Beobachter, nennen wir sie A und B, jeder mit einer Blendlaterne ausgestattet, stellen sich möglichst weit voneinander auf. A öffnet die Blende seiner Laterne, und sobald B den Lichtblitz sieht, quittiert er ihn durch Aufblenden seiner Laterne. Mißt man, so *Galilei*, bei A die Zeit zwischen dem abgehenden Lichtsignal und dem Eintreffen der Antwort, läßt sich mit Hilfe der bekannten Entfernung A–B die Lichtgeschwindigkeit bestimmen.

Versuche, diesen im Grunde verblüffend einfachen Vorschlag zu verwirklichen, schlugen sämtlich fehl und ergaben die unterschiedlichsten Resultate. Die Zeit nämlich, die das Licht für Hin- und Rückweg benötigt, ist auch bei den größten auf der gekrümmten Erdoberfläche möglichen Entfernungen verschwindend gering gegenüber der stark schwankenden Reaktionszeit der Experimentatoren.

Galileis Verdienst, Antwort auf die Frage nach der Lichtgeschwindigkeit durch Experimente gesucht zu haben, wird durch diese Mißerfolge nicht geschmälert.

Heute, da wir kleinste Bruchteile einer Mikrosekunde genau bestimmen können, werden auf ähnliche Weise, nur gewissermaßen umgekehrt, mit Hilfe der *bekannten* Lichtgeschwindigkeit *unbekannte* Entfernungen gemessen. Denken wir zum Beispiel an die sowjetisch-französischen Experimente zur Bestimmung der Mondentfernung, bei denen die Laufzeit von Laserlicht bis zu einem auf der Mondoberfläche aufgestellten Reflektor und zurück gemessen wurde. Oder denken wir daran, daß die wichtigsten Verfahren der Funkortung auf der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen, das heißt der Lichtgeschwindigkeit, beruhen.

Damals aber kannte man noch nicht einmal Uhren, mit denen sich Sekunden genau messen ließen, und damit lief das Licht allen Bemühungen, seine Geschwindigkeit auf der Erde zu bestimmen, einfach davon. Die erste Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit, deren Ergebnis der Wirklichkeit nahekam, benutzte daher kosmische Meßstrecken und eine »kosmische Blendlaterne«. Sie war kein Erfolg der Physiker, sondern der Astronomen.

Giovanni Domenico Cassini (1625 bis 1712), bereits mit 25 Jahren Professor der Astronomie in Bologna, wurde 1669 Direktor der Pariser Sternwarte. Zu den von ihm bearbeiteten Forschungsthemen zählte vor allem die Beobachtung der Jupitermonde. Er bestimmte ihre Umlaufzeit und faßte die Resultate noch in Bologna in Tafeln zusammen. In Paris setzte er diese Arbeiten fort. Dabei half ihm *Olaf Römer* (1644 bis 1710), ein junger dänischer Astronom, der seit 1671 in Paris arbeitete.

Beide Forscher beobachteten eine merkwürdige Erscheinung: Die Umlaufzeit des Jupitertrabanten »Jo«, der bei jedem Umlauf für eine bestimmte Zeitspanne im Schatten des Planeten verschwand, schien periodisch zu schwanken. Einmal ging der Trabant »vor«, das heißt, die nächste Verfinsterung trat eher ein, als nach den Berechnungen zu erwarten war; ein andermal ging er »nach«; die Zeitspanne zwischen aufeinanderfolgenden Verfinsterungen war gegenüber den Berechnungen zu groß. Nicht genug damit: Die Schwankungen hingen offensichtlich mit der Erdbewegung zusammen.

Bei keinem Himmelskörper hatte man je solche Änderungen beobachtet. Noch rätselhafter war, daß die Änderungen mit der Bewegung eines anderen Planeten, der Erde, zusammenzuhängen schienen.

Wechselt, so überlegt *Römer*, tatsächlich der Zeitpunkt der Verfinsterung, oder sehen wir dieses Ereignis nur zu unterschiedlichen Zeiten, weil das Licht einmal mehr, einmal weniger Zeit vom Jupiter bis zur Erde benötigt?

Die erste Annahme war unwahrscheinlich. Die zweite Erklärungsmöglichkeit hingegen ergab sich fast von selbst, wenn man davon ausging, daß zwar der Trabant gleichmäßig umlief, sein Licht sich jedoch mit endlicher Geschwindigkeit fortpflanzte. Dann nämlich mußte die Zeit, die es bis zur Erde brauchte, von der jeweiligen Distanz zwischen beiden Planeten abhängen. Die Verfinsterung würde auf der Erde um so später zu bemerken sein, je weiter Erde und Jupiter voneinander entfernt waren.

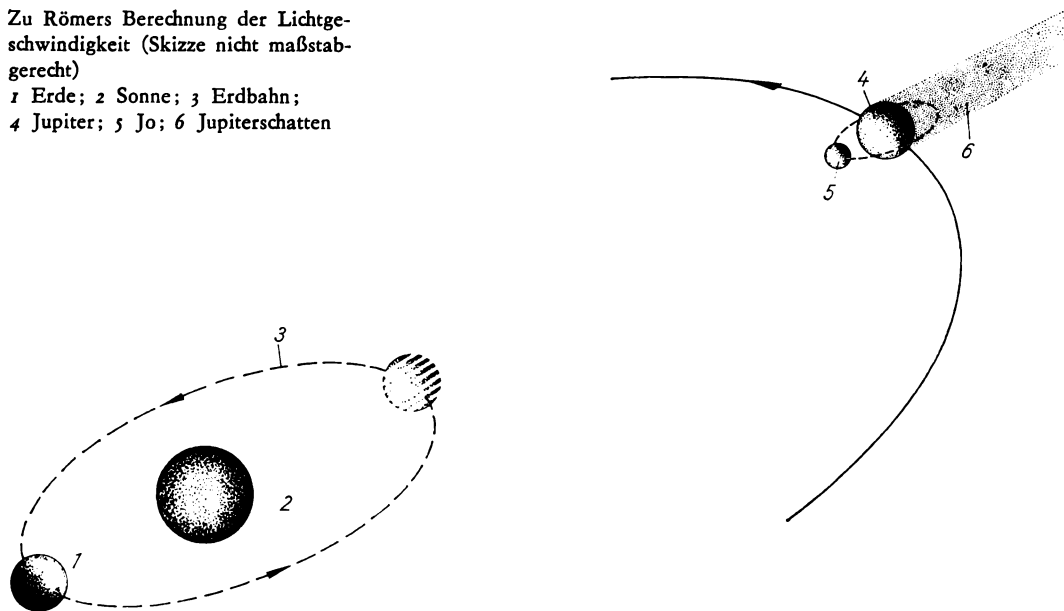
Zwischen der kürzesten und der weitesten Entfernung Erde–Jupiter lag mit etwa 300 Millionen Kilometer der bekannte Erdbahndurchmesser. Für diese Strecke benötigte das Licht annähernd 1000 s. Dividierte man die Wegstrecke durch die Zeit, ergab sich die Lichtgeschwindigkeit. *Römer* erhielt einen geringfügig über 300 000 km/s liegenden Wert (in heutigen Maßeinheiten ausgedrückt).

Obwohl dieses Resultat überraschend groß schien, war *Römer* von seiner Richtigkeit überzeugt (erklärte es doch unter anderem auch das Fehlschlagen von Meßversuchen auf der Erdoberfläche). Seine Kollegen in Paris, wo er die Ergebnisse im Herbst 1676 veröffentlichte, dachten allerdings anders darüber. *Römer* stieß auf Widerspruch und wurde sogar ausgelacht.

Fünf Jahre später kehrte er nach Dänemark zurück und übernahm die Leitung der Kopenhagener Sternwarte. Der größte Teil seiner Aufzeichnungen und wissen-

Zu Römers Berechnung der Lichtgeschwindigkeit (Skizze nicht maßstabgerecht)

1 Erde; 2 Sonne; 3 Erdbahn;
4 Jupiter; 5 Jo; 6 Jupiterschatten



schaftlichen Arbeiten fiel 1708 einem Brand zum Opfer, der weite Teile der Stadt in Asche legte.

Römers Arbeiten wurden nach seinem Tode durch eine zweite astronomische Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit bestätigt. Sie geht auf den englischen Astronomen *James Bradley* (1692 bis 1762), seit 1742 »Königlicher Astronom« und zugleich Direktor der weltberühmten Sternwarte von Greenwich, zurück.

Seit Aufstellung des Kopernikanischen Systems forderten seine Anhänger, mehr noch seine Gegner, einen »direkten« Beweis dafür, daß die Erde auf einer Kreis- bzw. Ellipsenbahn die Sonne umlief. Ein solcher Beweis wäre die Feststellung einer »Fixsternparallaxe« gewesen: Ein Fixstern mußte, je nachdem von welchem Punkte der Erdbahn aus er beobachtet wurde, unter einem etwas anderen Winkel erscheinen. Im Laufe eines Jahres mußte er infolgedessen gegenüber dem Himmelshintergrund eine scheinbare Bewegung vollführen – ähnlich wie sich ein nicht zu ferner Baum, vom Fenster eines fahrenden Zuges betrachtet, gegenüber dem Horizont zu verschieben scheint.

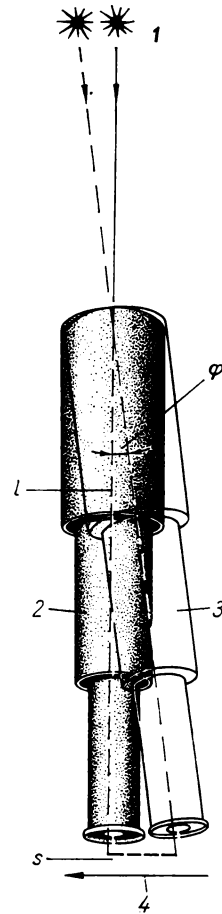
Man wußte, daß diese Ortsveränderung sehr gering sein würde. In der Tat reichten die damaligen Beobachtungshilfsmittel nicht aus, sie eindeutig festzustellen. Scheinbare Erfolge erwiesen sich später als Irrtümer (erst im 19. Jahrhundert wurden Fixsternparallaxen gemessen).

Auch *Bradley* suchte nach einer Fixsternparallaxe, und auch er beobachtete scheinbare Ortsveränderungen der Fixsterne. Nur – mit Parallaxe konnten sie nichts zu tun haben; denn die durchlaufenen Bahnen hätten unter anderem bedeutet, daß alle Fixsterne gleich weit von der Erde entfernt sind.

Im Jahresverlauf beschreiben Fixsterne im Zenit annähernd einen Kreis, alle übrigen, je nach ihrer Stellung zur Ebene der Erdbahn, mehr oder weniger langgestreckte Ellipsen.

Das Zustandekommen dieser »Aberration«, dieses »Abirrens«, haben wir, wenn auch in irdischen Maßstäben, sicherlich schon beobachtet: Senkrecht fallender Regen hinterläßt an den Scheiben des fahrenden Zuges eine mehr oder weniger geneigte Spur – er scheint schräg von vorn zu kommen.

Licht verhält sich entsprechend. Beobachten wir der Einfachheit halber einen genau über uns stehenden Stern, dessen Licht die Mitte des Fernrohrobjektivs treffen möge. In der Zeitspanne t , in der das Licht die Strecke l im Fernrohr durchläuft, bewegt sich dieses mit der Erde um ein Stück s senkrecht zur Lichteinfallrichtung. Infolgedessen erscheint der beobachtete Stern nicht in der Mitte des Okulars, sondern seitlich verschoben. Um das zu korrigieren, muß das Fernrohr etwas in Richtung der Erdbahn geneigt werden. Der scheinbar in Verlängerung der Fernrohrachse liegende Stern »rutscht« damit ein Stückchen in Erdbahnrich-



Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus der Aberration
 1 Stern; 2 Fernrohr bei ruhender Erde; 3 Fernrohr bei bewegter Erde; 4 Erdbahnbewegung

tung voraus. Den erforderlichen Neigungswinkel können wir aus dem eingezeichneten rechtwinkligen Dreieck entnehmen:

$$\tan \varphi = \frac{s}{l}.$$

Drücken wir s und l mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit c und der Erdbahngeschwindigkeit v aus, gilt:

$$\tan \varphi = \frac{v t}{c t} = \frac{v}{c}.$$

Der Winkel φ wird also nur durch das Verhältnis aus Licht- und Erdbahngeschwindigkeit bestimmt. Wegen des großen Geschwindigkeitsunterschieds ist er sehr klein – über 16 000mal müßte man ihn aneinanderlegen, um auf einen rechten Winkel zu kommen; doch schon zu Lebzeiten *Bradleys* war ein so winziger Winkel meßbar. Auch die Bahngeschwindigkeit der Erde kannte man schon, und so ließ sich die Lichtgeschwindigkeit nach der Beziehung

$$c = \frac{v}{\tan \varphi}$$

bestimmen. Das führte wieder auf einen Wert nahe 300 000 km/s.

Daß die Astronomen auf zwei völlig verschiedenen Wegen beinahe übereinstimmende Werte für die Lichtgeschwindigkeit erhalten hatten, war überzeugend. Die endgültige Bestätigung – eine Messung auf der Erdoberfläche, vielleicht sogar im begrenzten Raum eines Laboratoriums – scheiterte nach wie vor daran, daß es noch keine Möglichkeit gab, kürzeste Zeitspannen exakt abzugrenzen und zu messen.

Bis zur ersten Lichtgeschwindigkeitsmessung auf der Erde vergingen daher noch mehr als 100 Jahre. Der französische Physiker *Armand Louis Hippolyte Fizeau* (1819 bis 1896) führte sie im Jahre 1849 durch.

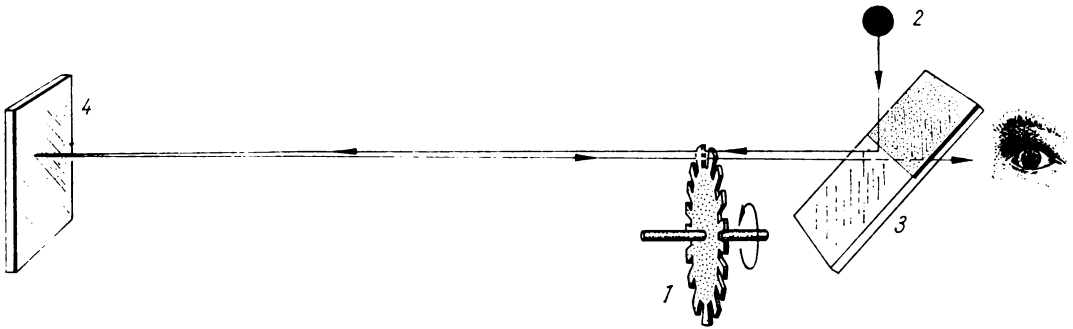
Wahrscheinlich hat bei seinen Überlegungen der Vorschlag *Galileis* Pate gestanden, nur ging *Fizeau* von den inzwischen weit besseren technischen Möglichkeiten aus und vermied es, den Menschen als Glied *in* die Meßkette einzuschalten. Das Auge sollte nur das Ergebnis feststellen.

Dies ist das Prinzip der Zahnradmethode:

Ein Lichtstrahl passiert auf dem Wege zu einem entfernten Spiegel die Lücken eines Zahnrades, wird vom Spiegel reflektiert und erreicht, wieder durch die Lücken des Zahnrades, das Auge des Beobachters am Standort der Lichtquelle.

Solange das Zahnrad stillsteht, treffen ursprüngliches und vom Spiegel reflektiertes Licht die Zahnücke, der Beobachter sieht das zurückkehrende Licht.

Daran ändert sich auch nichts, wenn das Zahnrad in zunächst langsame Drehung versetzt wird. Steigert man jedoch die Drehzahl ständig, findet, wenn sie einen bestimmten Wert erreicht hat, das reflektierte Licht keine Lücke mehr, sondern bereits den folgenden Zahn vor. Infolgedessen ist es vom Beobachter nicht wahrzunehmen. Bei weiterer Geschwindigkeitssteigerung wird schließlich eine Drehzahl erreicht, bei der das Licht wieder erscheint: Es fällt jetzt bereits durch die nächste Zahnücke.



Prinzip der Zahnradmethode Fizeaus
 1 Zahnrad; 2 Lichtquelle; 3 halb-
 durchlässiger Spiegel; 4 Spiegel

Aus der Drehzahl des Rades bei Verdunklung des Gesichtsfeldes, aus der Anzahl seiner Zähne bzw. Zahnlücken und aus der Wegstrecke, die das Licht zwischen Zahnrad und Spiegel auf dem Hin- und Rückweg durchläuft, kann man die Lichtgeschwindigkeit ausrechnen.

Fizeau kannte natürlich die aus astronomischen Messungen erhaltenen Werte für die Lichtgeschwindigkeit; sie halfen ihm, die Abmessungen seiner Versuchsanordnung abzuschätzen. Dabei ging es nicht ohne Kompromisse ab. Technisch einfach wäre ein möglichst kurzer Lichtweg gewesen – er bedeutete einfache Lichtquellen, es war nicht schwer, den Lichtstrahl »zusammenzuhalten«. Kurzer Lichtweg aber hieß andererseits: sehr schneller Wechsel zwischen Zahn und Lücke, also entweder hohe Drehzahl des Rades oder eine sehr große Zahl von Zähnen und Zahnlücken – am liebsten beides zusammen. Diese Forderung aber war nicht zu erfüllen.

Daher sah *Fizeaus* Anordnung so aus:

Die von einer sehr hellen Lichtquelle ausgehenden Strahlen traten durch eine Sammellinse in den seitlichen Ansatz eines Fernrohr tubus. Von einer unter 45° angebrachten Glasplatte wurden sie teilweise reflektiert und vereinigten sich nahezu in einem Punkt. Er lag in der Ebene des Zahnrades und traf entweder eine Lücke oder einen Zahn. Das Rad selbst hatte 720 Zähne und ebenso viele Lücken gleicher Breite.

Eine weitere Sammellinse formte aus dem durch eine Lücke fallenden Licht ein paralleles Strahlenbündel, einen »Lichtstrahl«. Er durchlief eine 8633 m lange, genauestens ausgemessene Strecke, wurde am Ende erneut mit einer Linse vereint und von einem in deren Brennebene liegenden Spiegel reflektiert. Das Licht durchlief nunmehr die Meßstrecke in umgekehrter Richtung und gelangte schließlich in das Auge des Beobachters.

Wir können kaum ermessen, welche langwierige, ermüdende Arbeit – tage-, wochenlang – es bedeutete, die Anordnung mit ihren Linsen, Glasplatten, dem reflektierenden Spiegel so zu justieren, daß das ausgesandte Licht tatsächlich »in sich selbst« reflektiert wurde. Bereits ein Winkel von nur einer Minute zwischen hin- und rücklaufendem Strahl hätte ja ausgereicht, um letzteren über 2 m neben

der Meßanordnung eintreffen zu lassen! Der eigentliche Versuch mutete gegenüber diesen Vorarbeiten fast wie ein Kinderspiel an.

Endlich war es soweit: Das Zahnrad lief an, das Gesichtsfeld des Beobachters blieb hell. Bei 12,6 Zahnradumdrehungen in der Sekunde verdunkelte es sich erstmals: Der auf die »Abgangslücke« folgende Zahn verspernte dem rückkehrenden Licht den Weg zum Auge des Beobachters. Schneller lief das Rad, immer rascher. Wieder Helligkeit, dann bei 25,2 Umdrehungen je Sekunde wieder Dunkel – das reflektierte Licht suchte sich seinen Weg durch die nächste Lücke usw. Der Rest war Rechenarbeit. Das Licht legte 2·8633 m genau in der Zeitspanne zurück, während der sich das Zahnrad um eine Zahn- bzw. Lückenbreite weitergedreht hatte. Diese Zeitspanne aber ergab sich aus der Drehzahl und der Zahl der Zähne und Lücken. Als *Fizeau* aus diesen Werten die Lichtgeschwindigkeit errechnete, kam er auf 313 000 km/s. Zwar lag dieser Wert höher als die vorher gemessenen, doch war die Abweichung so gering, daß sie als Bestätigung der bisher bekannten Werte gelten konnte. Überdies führten weitere Messungen nach dem gleichen Verfahren, bei denen man die Meßgenauigkeit erhöht hatte, zu immer geringeren Unterschieden.

Aus Meßstrecken von vielen Millionen Kilometern waren einige tausend Meter geworden, die Messungen erfolgten auf der Erde, der Physiker hatte den Astronomen abgelöst.

Trotzdem war man nicht zufrieden. Man wollte die Lichtgeschwindigkeit im Laboratorium messen, mit einer Wegstrecke von wenigen Metern auskommen. Nur auf diese Weise nämlich würde es möglich sein, zu erfahren, wie schnell sich Licht nicht nur in Luft oder im Vakuum, sondern auch in anderen Stoffen ausbreitet.

Es ging dabei beileibe nicht nur um »Zahlen«, sondern um weit mehr. Im Streit darum (s. S. 85), ob Licht ein Hagel kleinster Teilchen oder aber eine kontinuierliche Wellenbewegung sei, kam der Lichtgeschwindigkeit eine Art Schiedsrichterrolle zu: Sie ist, so hatte *Newton* behauptet, zum Beispiel in Glas größer als in Luft, während *Huygens*, sein Widersacher, gegenteiliger Ansicht war. Aber beide konnten ihren Standpunkt nicht durch Messungen belegen. Diese sollten nun nachgeholt werden.

Das Verdienst, die Lichtgeschwindigkeit als erster im Zimmer gemessen zu haben, gebührt ebenfalls einem französischen Physiker, nämlich *Bernard Léon Foucault* (1819 bis 1868). Jeder Schüler kennt heute seine Pendelversuche zum Nachweis der Erddrehung.

Was für *Fizeau* 1849 das Zahnrad gewesen war, wurde 13 Jahre später für *Foucault* ein kleiner Spiegel, der mit Hilfe einer kleinen Druckluftturbine um eine in der Spiegelebene liegende Achse in sehr rasche Drehung (mehrere hundert Umdrehungen je Sekunde) versetzt werden konnte. Ihm verdankt die Drehspiegelmethode ihren Namen.

Sehen wir uns zunächst an, welchen Weg das Licht bei stillstehendem Drehspiegel durchläuft.

Es erreicht ihn durch einen Spalt, eine unter 45° geneigte Glasplatte und eine Sammellinse. Der Drehspiegel reflektiert es auf einen sphärischen Hohlspiegel. Die Abstände zwischen Spalt, Linse, Dreh- und Hohlspiegel sind so gewählt, daß auf dem Hohlspiegel ein Bild des hellen Spalts entworfen wird. Vom Hohlspiegel

aus läuft das Licht auf dem gleichen Wege zurück. Ein Teil davon wird jedoch an der Glasplatte um 90° umgelenkt und erreicht das Beobachtungsfernrohr. In ihm kann das Bild des Spalts beobachtet werden.

Der Drehspiegel wird nun, zunächst langsam, in Drehung versetzt. Die Folge: Das Spaltbild blinkt oder flimmert; denn es gelangt immer nur dann Licht in das Beobachtungsmikroskop, wenn der Drehspiegel die der Ruhelage entsprechende Stellung durchläuft. Erhöhen wir die Drehzahl, hört das Flimmern auf. Unser träges Auge sieht ein stehendes Bild.

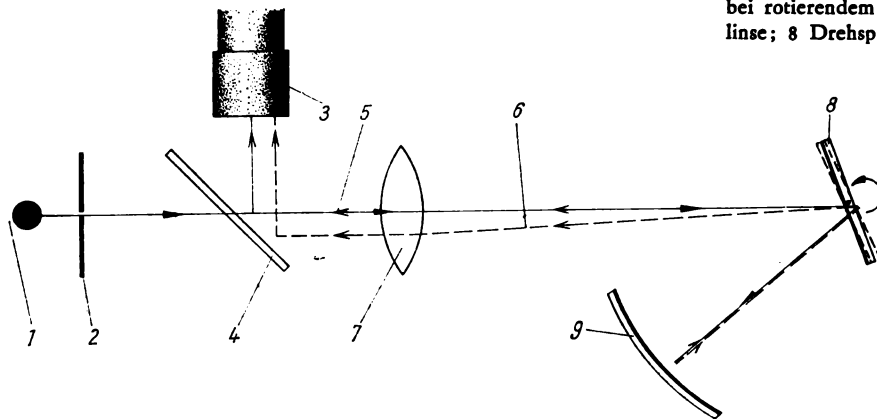
Was aber ist zu erwarten, wenn der Spiegel sich sehr rasch dreht? Wenn das Licht vom Hohlspiegel zurückkommt, hat er sich bereits um einen merklichen Winkel weitergedreht, das Licht wird nicht mehr genau in die Herkunftsrichtung reflektiert. Im Beobachtungsmikroskop erscheint infolgedessen das Spaltbild bei schnell rotierendem Spiegel gegenüber demjenigen verschoben, das bei ruhendem Spiegel beobachtet wird. Aus der Größe dieser Verschiebung wie aus den übrigen Versuchsdaten läßt sich die Lichtgeschwindigkeit errechnen.

Foucault erhielt 298 000 km/s. Weil er mit einem Lichtweg von nur wenigen Metern auskam, konnte die Lichtgeschwindigkeit auch in anderen Stoffen als in Luft bestimmt werden. Man brauchte diese – etwa Wasser in einer Röhre – nur zwischen Dreh- und Hohlspiegel zu bringen. Messungen, von *Foucault* und anderen auf diese Weise unternommen, bestätigten die Ansichten von *Huygens* und damit die Wellentheorie – wenn auch erst zu einem Zeitpunkt, da diese bereits auf anderen Wegen erwiesen und anerkannt war (s. S. 92).

Messungen nach der Drehspiegelmethode wurden bis in die jüngste Zeit häufig wiederholt; technische Verbesserungen erhöhten ihre Genauigkeit. So ersetzte man den ebenen Drehspiegel durch ein rotierendes regelmäßiges Prisma mit spiegelnden Seitenflächen, für genaue Messungen in Luft wurde auch die Meßstrecke wieder verlängert.

Drehspiegelmethode Foucaults

1 Lichtquelle; 2 Spalt; 3 Beobachtungsfernrohr; 4 Glasplatte; 5 Strahlengang (vereinfacht) bei ruhendem Spiegel; 6 Strahlengang (vereinfacht) bei rotierendem Spiegel; 7 Sammellinse; 8 Drehspiegel; 9 Hohlspiegel



Der nordamerikanische Physiker *Albert Abraham Michelson* (1852 bis 1931) arbeitete mit einer Meßstrecke von mehr als 35 km Länge. Eine eigens für dieses Unternehmen eingesetzte geodätische Expedition hatte sie zwischen zwei Bergspitzen ausgemessen. *Michelson* erhielt einen Wert von $(299\,774 \pm 11)$ km/s.

Aber auch *Fizeaus* Verfahren geriet nicht in Vergessenheit. Man ließ das Zahnrad zur periodischen Unterbrechung des Lichtwegs weg und brachte an seiner Stelle eine Kerrzelle an, so benannt nach dem Physiker *John Kerr* (1824 bis 1907). Es ist dies eine Einrichtung, die es ermöglicht, mit Hilfe einer elektrischen Spannung einen Lichtstrahl nahezu trägheitslos auf- und abzublenzen. Legt man Wechselspannung an die Kerrzelle, wird das Licht im Rhythmus dieser Spannung unterbrochen – hunderttausendmal, millionenmal in jeder Sekunde. Andererseits aber lassen sich Wechselspannungen größter Frequenzkonstanz ohne große Schwierigkeiten gewinnen, und daher konnte man die Kerrzelle als äußerst konstant und beinahe beliebig schnell laufendes elektrisches Zahnrad einsetzen. Eine 1950 auf diese Weise durchgeführte Messung ergab, auf Vakuum umgerechnet, für die Lichtgeschwindigkeit einen Wert von $(299\,792,7 \pm 0,25)$ km/s.

Überraschend zunächst, dann aber eine glänzende Bestätigung der im 19. Jahrhundert aufgedeckten Zusammenhänge zwischen optischen und elektrischen Erscheinungen war, daß sich die Lichtgeschwindigkeit – anfänglich recht »grob« – aus der Messung elektrischer Konstanten ergab, die scheinbar mit Licht überhaupt nichts zu tun hatten, bei deren Messung weder Lichtstrahlen noch optische Instrumente auch nur als Hilfsmittel herangezogen wurden.

Multiplizierte man Influenzkonstante und Induktionskonstante, zwei mit dem elektrischen beziehungsweise dem magnetischen Feld verknüpfte unveränderliche Zahlenwerte, miteinander, ergab sich ein Resultat, das dem Kehrwert des Quadrats der Lichtgeschwindigkeit auffällig nahekam. Die weitere Durchdringung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen zeigte, daß dies kein Zufall, sondern eine Notwendigkeit war. Man konnte demnach die Lichtgeschwindigkeit ohne Licht, nur durch genaueste Messung dieser Konstanten, bestimmen. (Besondere Verdienste dabei erwarben im Jahre 1856 die deutschen Physiker *R. Kohlrausch* und *W. Weber*.) Dies geschah mehrfach, und man erhielt (1907) einen Lichtgeschwindigkeitswert von $(299\,784 \pm 10)$ km/s.

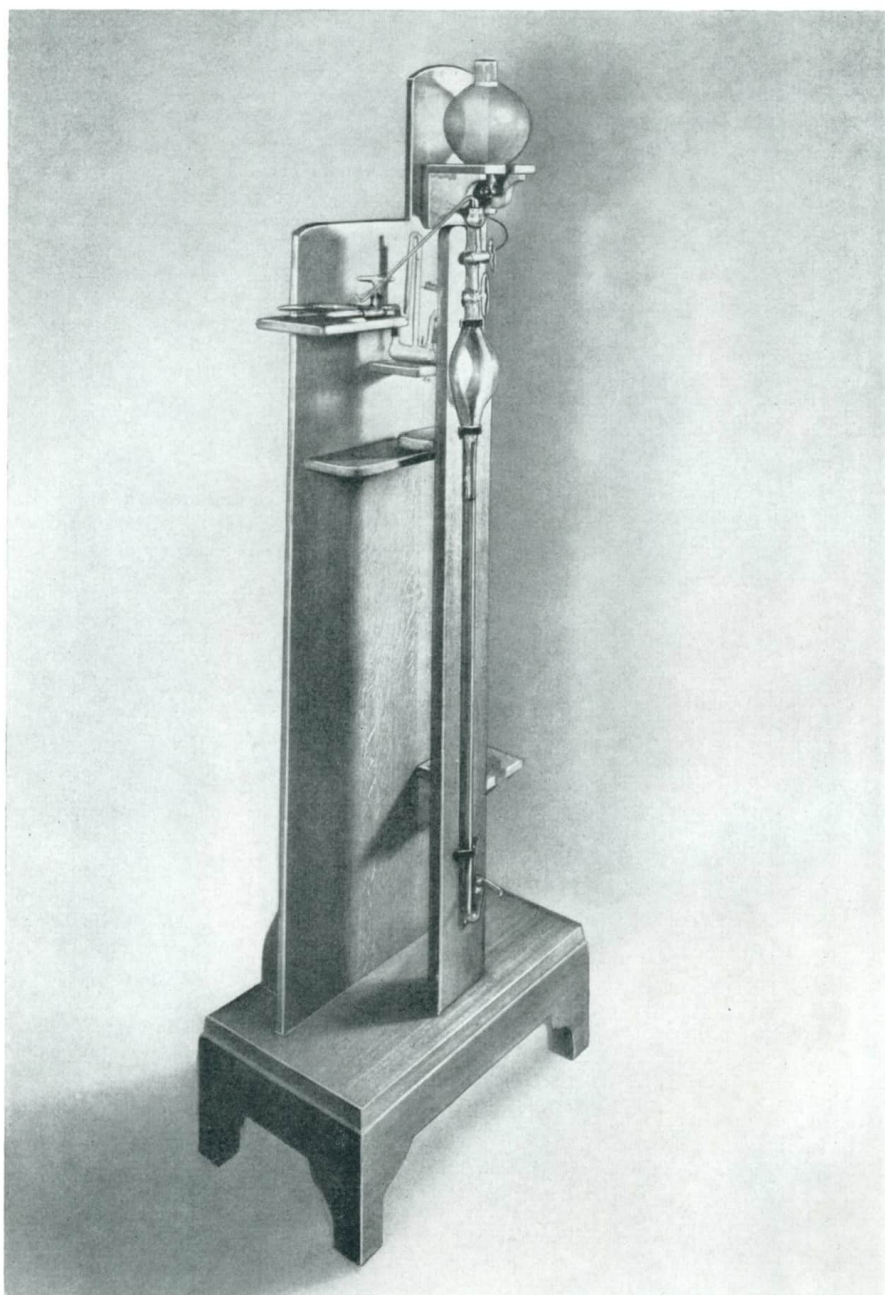
Noch im 19. Jahrhundert hatte man gefunden (s. S. 130), daß Lichtwellen nur Teil einer großen Wellenfamilie, der der elektromagnetischen Wellen, sind, deren Mitglieder sich zwar vielfältig durch ihre Frequenz, ihre Erzeugungs- und Nachweismethoden sowie in ihrer Ausbreitung unterscheiden, jedoch alle eines gemeinsam haben: die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die »Lichtgeschwindigkeit«.

Wer diese Geschwindigkeit messen wollte, war daher nicht unbedingt auf Licht angewiesen, sondern konnte ein anderes Familienmitglied auswählen, zum Beispiel die von *Heinrich Hertz* nachgewiesenen und erforschten Wellen, die heute Funkwellen heißen.

Jedes Radargerät, das Entfernungen durch Aussenden von Wellenimpulsen und Empfangen der Echoimpulse eines reflektierenden Körpers mißt, setzt die bekannte und konstante Laufzeit der Wellen, damit also die Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit, voraus. Mißt man umgekehrt die Laufzeit eines Wellenimpulses bis zu einem reflektierenden Ziel in bekannter Entfernung und zurück, ergibt sich

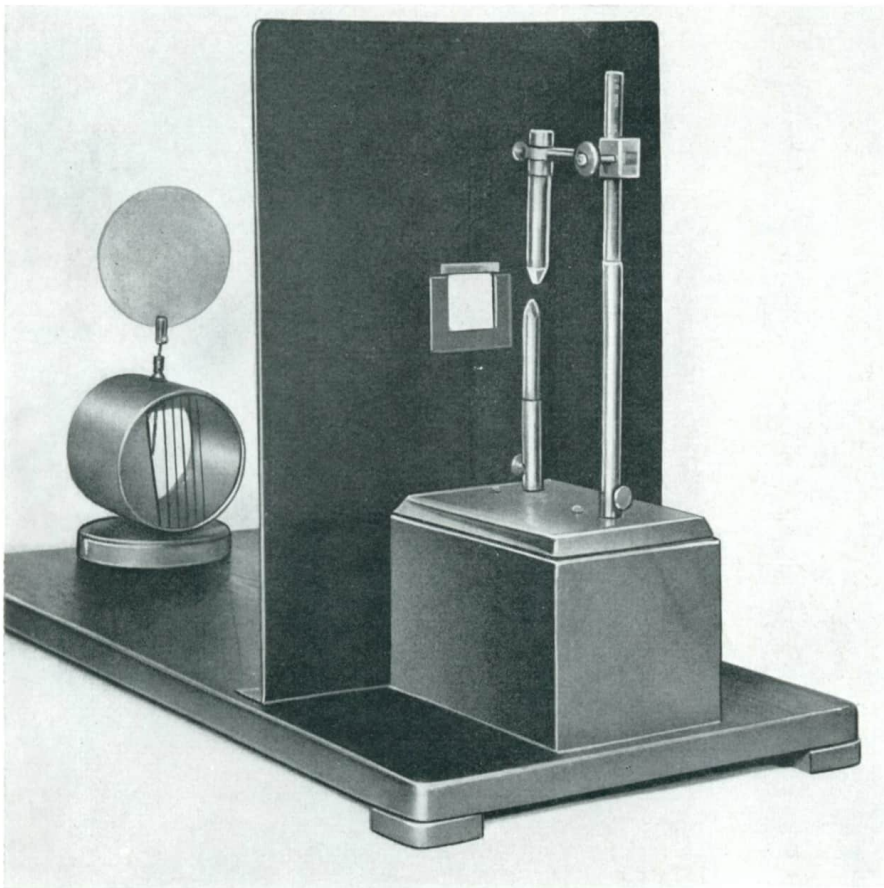


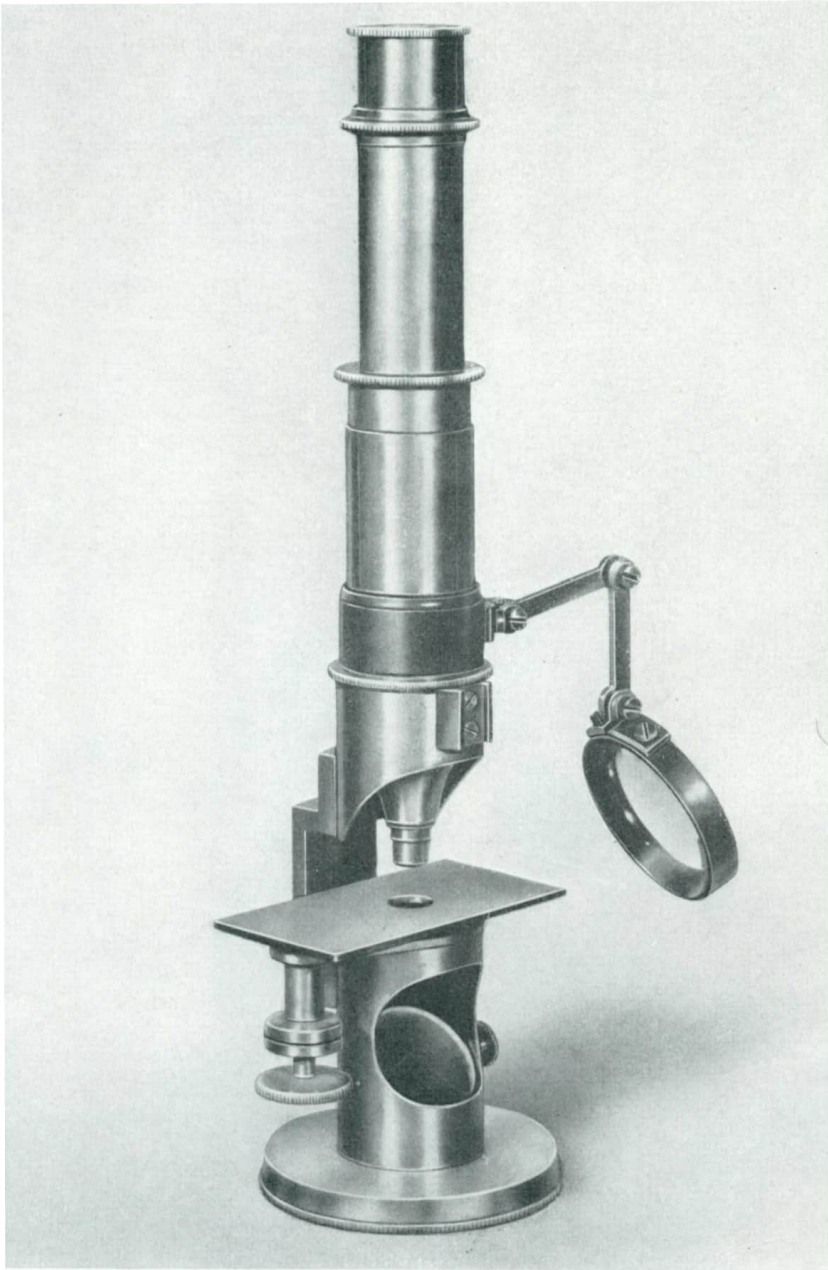
Monokulare Handfernrohre aus der
2. Hälfte des 18. Jahrhunderts. Foto:
G. Linde, Jena



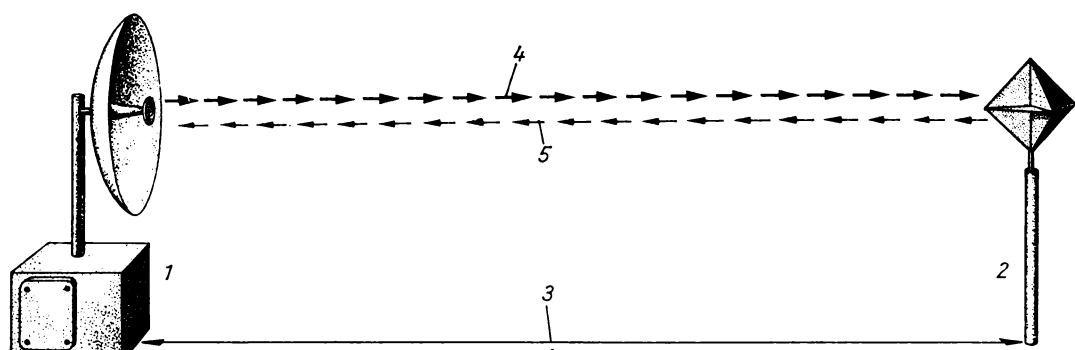
Quecksilberluftpumpe von Heinrich Geißler, mit deren Hilfe die Röhren zur Untersuchung der Katodenstrahlen evakuiert wurden (1857). Foto: Deutsches Museum München

Mit dieser Apparatur von W. Hallwachs, bestehend aus Kohlebogenlampe, Schirm und Elektroskop, wurde der für die moderne Elektronik wichtige äußere lichtelektrische Effekt entdeckt und erforscht (1888).
Foto: Deutsches Museum München





Zusammengesetztes Mikroskop mit
Tischfokussierung (nach 1850). Foto:
VEB Carl Zeiss Jena



Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit
nach dem Radarprinzip

1 Radargerät; 2 Radarreflektor;
3 bekannte Entfernung; 4 Radarim-
pulse; 5 reflektierte Impulse

die Lichtgeschwindigkeit. Seit 1947 wurden derartige Messungen mehrfach durchgeführt.

Aber auch für die Geschwindigkeitsmessung mit Funkwellen muß man nicht unbedingt das Labor verlassen: Man kann etwa auf Drahtleitungen »stehende« Wellen bekannter Frequenz erzeugen, ihre Länge messen und daraus die Ausbreitungsgeschwindigkeit errechnen. Man kann für den gleichen Zweck auch Mikrowellen und einen Hohlraumresonator heranziehen, einen mit leitenden Wänden versehenen Hohlkörper, in dessen Innenraum elektromagnetische Wellen Schwingungsbäuche und -knoten bilden, aus deren Abstand sich bei bekannter Frequenz der Schwingungen die Lichtgeschwindigkeit ergibt. $(299\,792 \pm 3)$ km/s erhielt man nach diesem Verfahren (1950).

Gerade in den letzten Jahren aber vollzieht sich wieder eine Rückkehr zum Licht: Die kurzen, extrem leistungsstarken Lichtimpulse, die ein Laser ausstrahlt, durchmessen mit Leichtigkeit Tausende und Hunderttausende von Kilometern durch den Weltraum. Weiß man, wie weit sie liefen, kann man ihre Geschwindigkeit bestimmen; weiß man, wie schnell sie sind, können sie als Entfernungsmesser dienen. Beide Möglichkeiten werden heute genutzt.

Gerade das aber macht deutlich, wie wichtig es ist, die Lichtgeschwindigkeit immer genauer zu bestimmen. 300 000 km/s, der Wert, den man sich als Schüler einprägt, reichen häufig, aber nicht immer. Selbst die jüngsten Messungen – sie ergaben $299\,792,4526$ km/s $\pm 1,1$ m/s – genügen den Physikern nicht in jedem Falle. Die Zukunft wird lehren, wie sich das noch zu große $\pm$ verringern läßt.

D

An den Quellen des mächtigsten Stromes

Der Blitz galt von jeher als eine der gewaltigsten und erschreckendsten Erscheinungen. Seit Jahrtausenden weiß man auch, daß einige Stoffe, nachdem sie gerieben wurden, andere anziehen.

Von abergläubischen und mystischen Vorstellungen freie Erklärungsversuche dieser Vorgänge, vor allem aber die Erkenntnis, daß sie nur verschiedene Erscheinungsformen ein und derselben Naturkraft sind, liegen noch keine 500 Jahre zurück. Die stetig fließende Elektrizität, der elektrische Strom, wurde an der Schwelle zum 19. Jahrhundert erstmals beobachtet und untersucht.

Seit einem guten Menschenalter können wir Lichtschalter betätigen, Elektromotoren an das Stromnetz anschließen, elektrisch heizen, kochen, bügeln und hundert andere Dinge tun.

Knapp sechs Jahrzehnte nur sind seit *Lenins* Wort vergangen: »Kommunismus – das ist Sowjetmacht plus Elektrifizierung des ganzen Landes.«

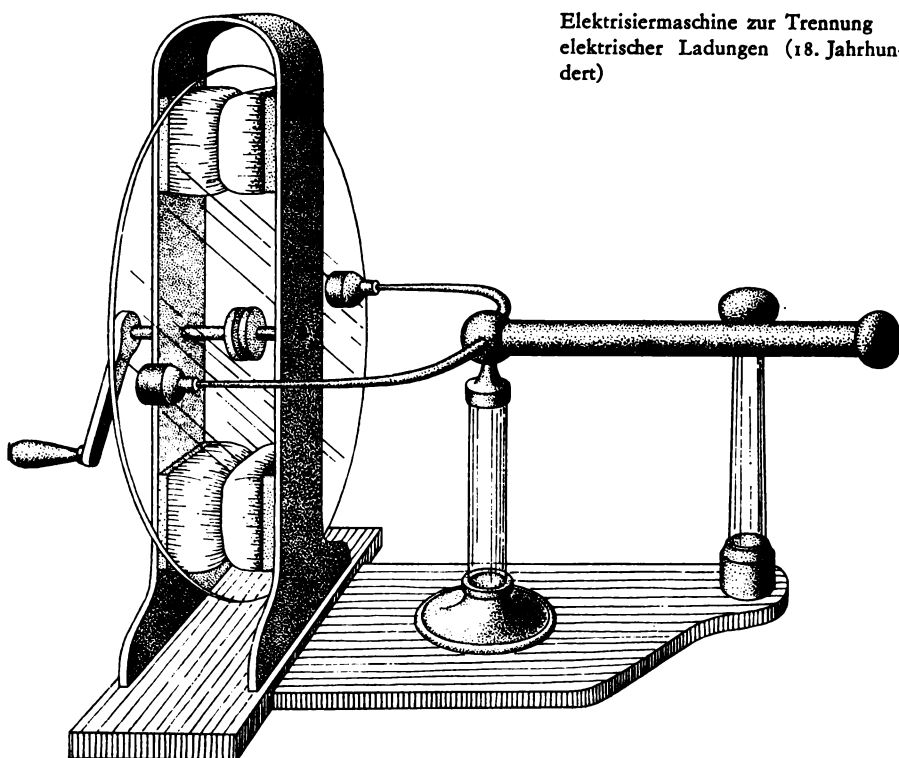
Heute rangiert der Pro-Kopf-Verbrauch an Elektroenergie in volkswirtschaftlichen Statistiken und Berichten an hervorragender Stelle. Jahr für Jahr nehmen neue Wasser-, Wärme- und Kernkraftwerke den Betrieb auf. Jeder weiß, daß die Deckung des rasch wachsenden Energiebedarfs zu den entscheidenden Aufgaben gehört, die in den kommenden Jahrzehnten von der Menschheit zu lösen sind, wenn diese nicht nur überleben, sondern besser leben will.

»Im Jahre 1780 ward durch die Gattin des Lehrers der Chirurgie an der Universität Bologna, *Aloisius Galvani*, eine Entdeckung gemacht, die im Laufe dieses Jahrhunderts die größten Umwälzungen in der Chemie und Physik hervorrufen sollte, so klein und scheinbar unbedeutend auch ihr Anfang war und so entschieden man auch das Wesen der neuen Entdeckung verkannte.«

So beginnt der Abschnitt »Galvanismus« eines physikalischen »Populären Handbuchs der Physik zum Selbstunterricht für die Gebildeten jedes Standes« aus der Mitte des 19. Jahrhunderts.

Wir wollen mit dem Autor nicht streiten, ob *Galvani* selbst oder seiner Frau der Ruhm des Entdeckers gebührt. Darüber ist jahrzehntelang ebensoviel Papier beschrieben und bedruckt worden wie über die äußeren Umstände der Entdeckung (auch die Darstellung auf S. 53 ist nur eine von vielen Versionen). Viel wichtiger ist, daß die Entdeckung des Galvanismus den Ausgangspunkt der *Elektrotechnik* markiert, denn mit elektrischen Erscheinungen hatte man sich bereits vorher, vor allem im 17. und 18. Jahrhundert, beschäftigt.

Man wußte, daß Stoffe durch Reiben elektrisch werden, und kannte einfache



Elektrisiermaschine zur Trennung elektrischer Ladungen (18. Jahrhundert)

Elektrisiermaschinen. Man unterschied zwischen einer Glaselektrizität (+) und einer Harzelektrizität (-), zwischen Leitern und Nichtleitern.

Durch die Erfindung der Leidener Flasche wurde die Elektrizität im wahren Sinne des Wortes mit einem Schlage weltberühmt:

Bei Versuchen, Elektrizität (die man sich häufig als eine Art feinsten Flüssigkeit vorstellte) »auf Flaschen zu füllen«, erhielten die Experimentatoren – *von Kleist* in Deutschland, *Cunäus* in Holland – unversehens elektrische Schläge, als würde (so ein Zeitgenosse) ihr Körper durch eine Mühle gedreht. Trotzdem widerstand selten jemand der Versuchung, eine Leidener Flasche selbst auszuprobieren. Sogar Professorengattinnen wagten sich daran und wurden, so der gleiche Chronist, »mit Hochachtung ob der gefährlichen Profession ihres Gemahls« erfüllt. Im übrigen mußte die Leidener Flasche vor allem für unterhaltsame Demonstrationen und Jahrmarktsexperimente erhalten, zu denen der Physiker und große Spötter *Georg Christoph Lichtenberg* (1742 bis 1799) einmal bemerkte: »ein sehr schönes und überraschendes Experiment, wofür der Experimentator ein paar Ohrfeigen bekommen ...«

Die erste echte Nutzung des Wissens von der Elektrizität sollte ihre Gefahren vermindern. *Benjamin Franklin* (1706 bis 1790), Politiker und Wissenschaftler zugleich, untersuchte vor allem die Luft- und Gewitterelektrizität und schuf den Blitzableiter.

Wichtiger für die Physik war, daß seine Arbeiten eine vorher nur mit Vorbehalten ausgesprochene Vermutung bestätigten: Zwischen dem Funken beim Entladen einer Leidener Flasche und dem Blitz bestand nur ein quantitativer Unterschied, Reibungselektrizität und Gewitterelektrizität waren wesensgleich.

Die Elektrizität machte sich aber auch noch auf eine ganz andere Weise bemerkbar.

Bereits *Plinius der Ältere* (23 bis 79) hatte von erschütternden und lähmenden Schlägen berichtet, die Zitterrochen austeilen können. 1761 vermerkte ein holländischer Schiffsarzt in seinem Tagebuch, daß der in amerikanischen Binnengewässern lebende Zitteraal sich ähnlich verhält und sogar den Tod von Menschen verursachen kann (das durch den Schlag gelähmte oder ohnmächtige Opfer ertrinkt). Die Wirkungsweise dieser Waffe war zunächst höchst rätselhaft. Nach der Erfindung der Leidener Flasche fiel jedoch auf, daß ihre Schläge gleiche Empfindungen und Nachwirkungen auslösten wie diejenigen von Zitterrochen und Zitteraal.

War diese Übereinstimmung zufällig, oder erteilten Zitterrochen und Zitteraal ihren Opfern *elektrische* Schläge? Gab es eine »tierische Elektrizität«, die vielleicht sogar mit der geheimnisvollen, allen Lebewesen angeblich innewohnenden »Lebenskraft« zusammenhing, an die viele glaubten und nach der viele suchten?

Der Engländer *John Walsh* wies 1773 nach, daß es tatsächlich elektrische Schläge waren. Er zeigte, daß die Schläge des Zitterrochens sich durch Leiter, nicht aber durch Isolatoren fortleiten lassen, daß mehrere Menschen, die sich an den Händen halten, auf diese Weise elektrisiert werden können, und daß die Wirkung in Luft heftiger ist als im Wasser, das die Entladung teilweise kurzschließt.

Wo Zitterrochen und Zitteraal ihre Elektrizität hernahmen, blieb *Walsh* und seinen Zeitgenossen verborgen. Erst *Galvanis* Arbeiten gaben den Anstoß für die richtige Erklärung, obgleich diese nicht von *Galvani* selbst gefunden wurde.

Luigi Galvani, 1737 in Bologna geboren, lehrte dort seit 1762 als Professor für Medizin. Daneben beschäftigte er sich mit Versuchen über die Elektrizität, für die er sich ein bescheidenes Instrumentarium – Elektrisiermaschine, Leidener Flaschen usw. – zusammengestellt hatte. Während einer Vorlesung im November 1780 geschah es, da ... – doch lassen wir wiederum das Handbuch sprechen:

»*Alois Galvani* befand sich mit einigen seiner Zuhörer in seinem Hörsaal. Seine Gattin hatte häufig unwillkürlich an seinen Vorlesungen Anteil genommen, und so war es auch diesmal. Sie zog mit dem hübsch scharfen Skalpell ... Frösche ab, um deren Schenkel zum Nachtessen zu rösten. Sie war mit ihrer Arbeit fertig und stand daher mit dem Skalpell in der Hand spielend an dem Tisch mit der zinnernen Schüssel, auf welcher die Froschschenkel lagen. Aus einer Elektrisiermaschine wurden knisternde Funken gezogen. Der Satz, den sie hören wollte, mochte zu Ende sein, sie legte das Messer nieder, es lag mit seiner Spitze auf den Nerven der Rückenwirbelsäule und sank aus ihrer Hand auf den Rand der Schüssel.

In diesem Augenblick streckte sich der halbe, abgezogene Frosch gewaltig und zitternd aus, so daß die Frau dachte, er lebe. Sie hob das Messer auf, und der Frosch lag ruhig in der bekannten zusammengezogenen Stellung. Sie berührte ihn abermals, und siehe, das eben Bemerkte geschah nochmals.

Die geistreiche, aufmerksame Frau fand hierin etwas sehr Ungewöhnliches und 53

rief ihren Gatten dazu. Nachdem dieser das Experiment gesehen, rief er entzückt aus: »Frau, ich habe eine große Entdeckung gemacht ... Ich habe die Ursache der Lebenskraft gefunden.«

Soweit ein Bericht von vielen, die – mitunter sogar in Versform – in Umlauf gesetzt wurden.

Allerdings verstrich bis dahin einige Zeit; denn erst elf Jahre später, 1792, erfuhr die Öffentlichkeit von *Galvanis* Beobachtungen, seinen anschließenden Versuchen und ihrer Deutung.

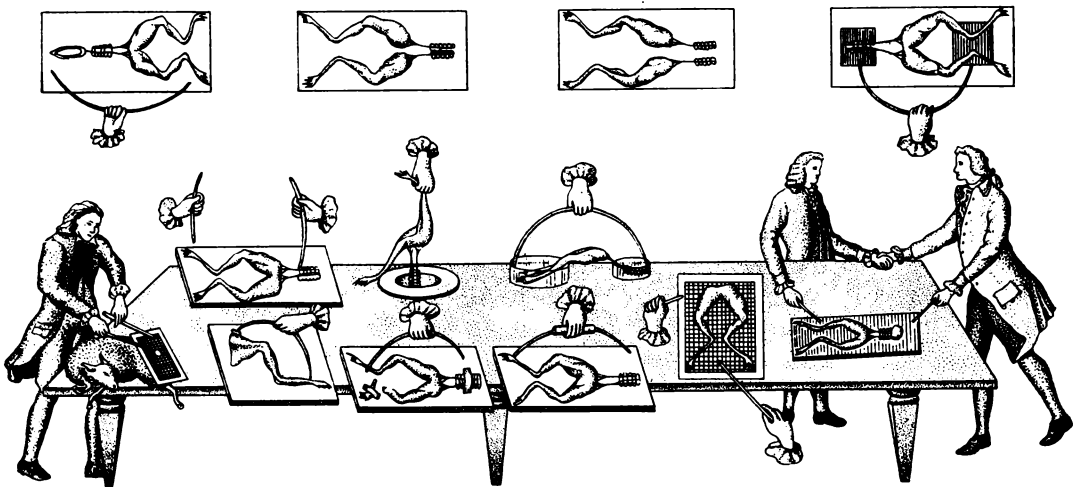
»Abhandlung über die elektrischen Kräfte der Muskelbewegung« nannte *Galvani* seine Arbeit. Sie zählte keine 60 Seiten, war sparsam illustriert, erregte aber nichtsdestoweniger größtes Aufsehen – und wurde das Todesurteil für Legionen von Fröschen, die nun ihr Leben auf Experimentiertischen in aller Welt lassen mußten.

Die mit Metall in Verbindung gebrachten Schenkel zuckten, wenn gleichzeitig Funken an der Elektrisiermaschine übersprangen:

»Nun schien«, so lesen wir bei *Galvani*, »uns nichts wichtiger als zu erörtern, ob die sogenannte atmosphärische Elektrizität dieselben Erscheinungen hervorrufen würde oder nicht, ob nämlich bei Anwendung derselben Kunstgriffe auch die Blitze Muskelzuckungen erregen würden.

Wir haben deshalb einen langen ... Eisendraht an einem höher gelegenen Orte des Hauses ausgespannt und isoliert, und daran, als ein Gewitter am Himmel aufgezogen war, präparierte Frösche oder präparierte Schenkel von Warmblütlern mit ihren Nerven aufgehängt. Auch an ihre Füße haben wir einen ... anderen Eisendraht geheftet, und zwar einen sehr langen, den wir bis in das Wasser eines Brunnen tauchen ließen. Die Sache verlief nach Erwarten ... So oft nämlich Blitze hervorbrachen, gerieten sämtliche Muskeln in demselben Augenblicke in

Zu Galvanis Froschenkelversuchen
(nach einer zeitgenössischen Skizze)



wiederholte, heftige Zuckungen, so daß immer die Muskelbewegungen wie der Schein der Blitze den Donnerschlägen vorangingen und diese gleichsam ankündigten.«

Was anderes sind diese Zeilen als die Beschreibung einer drahtlosen Übertragung, eines Gewittermelders, wie ihn *Alexander Stepanowitsch Popow* (1859 bis 1905), einer der Begründer der Funktechnik, ein gutes Jahrhundert später konstruierte? Funken, Blitze als Sender, Froschschenkel als Empfänger, verbunden mit einer Erdleitung und dem als Antenne dienenden Draht zu einem höher gelegenen Ort – auf diesen Elementen beruht die Funktechnik!

Diese Parallelen waren so verblüffend, daß man – wenngleich mehr als Kuriosum – *Galvanis* Versuche in unserem Jahrhundert und mit modernen technischen Mitteln wiederholte.

Ein zwischen Antenne und Erde geschalteter Froschschenkel, mit einem leicht beweglichen Schreibhebel verbunden, zeichnete auf einer rotierenden Trommel getreulich die Funktelegramme auf, die in 300 km Entfernung von der Eiffelturmstation ausgestrahlt wurden.

Wie erklärte *Galvani* diese Vorgänge? Er stellte sich Muskeln und Nerven der Frösche als eine Art Leidener Flasche vor, die sich bei Berührung mit Metall entlud und auf noch unbekannte Weise durch tierische Elektrizität, von der Elektrisiermaschine aus oder durch Gewitterelektrizität geladen wurde. *Galvani* versuchte die Wirkung der vermeintlichen Leidener Flasche sogar dadurch zu steigern, daß er die Nervenenden mit Stanniol umwickelte.

Galvani kam es darauf an, die Hypothese einer tierischen Elektrizität, von deren Richtigkeit er überzeugt war, zu untermauern. Alle Beobachtungen, alle Versuchsergebnisse deutete er aus dem Blickwinkel dieser vorgefaßten Meinung. So erkannte er auch die Erscheinungen nicht richtig, die zum Ausgangspunkt der Elektrotechnik wurden:

»Da ich zuweilen bemerkt hatte, daß präparierte Frösche, die an einem Eisengitter mit Messinghaken aufgehängt waren, in die gewöhnlichen Zuckungen verfielen, und zwar nicht nur beim Blitzen, sondern auch bei heiterem Himmel, so meinte ich, die Entstehung dieser Zuckungen sei von Veränderungen, die mit der atmosphärischen Elektrizität vor sich gingen, herzuleiten. Deshalb beobachtete ich zu verschiedenen Stunden, und zwar viele Tage lang, dazu passend hergerichtete Tiere, aber nur selten trat eine Bewegung in den Muskeln ein. Schließlich, durch das vergebliche Warten ermüdet, habe ich die Haken, die in dem Rückenmark befestigt waren, gegen das eiserne Gitter gedrückt, um zu sehen, ob durch einen solchen Kunstgriff die Zusammenziehung der Muskeln erregt würde. Dabei beobachtete ich ziemlich häufig Zuckungen. Es fehlte nicht viel, und ich hätte letztere der atmosphärischen Elektrizität zugeschrieben.

Als ich aber das Tier in das geschlossene Zimmer gebracht, auf eine Eisenplatte gelegt und angefangen hatte, gegen letztere den in dem Rückenmark befindlichen Haken zu drücken, bemerkte ich die gleichen Zuckungen. Dasselbe habe ich wiederholt unter Anwendung von anderen Metallen, an anderen Orten und zu anderen Stunden und Tagen erprobt und stets das gleiche Ergebnis gefunden, nur daß die Zuckungen infolge der Verschiedenheit der Metalle verschieden waren, bei den einen nämlich heftiger, bei den anderen langsamer . . .«

Zwei Metalle, der elektrisch leitende Froschschenkel, Wirkungen, die offensichtlich mit der Natur der Leiter im Zusammenhang standen: Ganz dicht stand hier *Galvani* vor der Entdeckung jener Erscheinungen, die später (nicht zu Recht) seinen Namen erhielten.

Doch er beachtete diese, wie er glaubte, Nebeneffekte zu wenig. Auch diesmal meinte er, nur eine weitere Bestätigung dafür gefunden zu haben, daß den Tieren selbst Elektrizität innewohne, und diese Ansicht verteidigte er geradezu verbissen. Er verstellte sich damit selbst den Weg zum Erkennen des wirklichen Geschehens, und es nimmt daher nicht wunder, daß er sich immer öfter mit Gegnern seiner Ansichten auseinanderzusetzen hatte. Wenige Monate nach seinem Tode mußte die Lehre von der tierischen Elektrizität unter dem Eindruck neuer Beobachtungen und Erkenntnisse für immer aufgegeben werden.

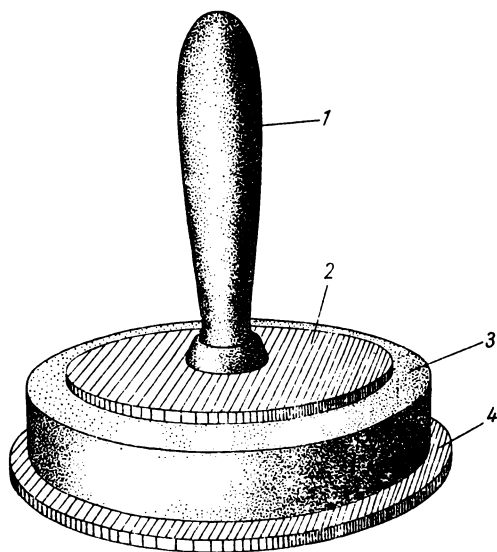
Unter denen, die *Galvanis* Arbeiten kritisch untersuchten und zu entscheidenden neuen Ergebnissen weiterführten, war vor allem sein Landsmann *Alessandro Volta* (1745 bis 1827).

Bereits während seiner Schul- und Studienzeit hatte sich *Volta* mit elektrischen Erscheinungen beschäftigt. 1774 zum Professor der Physik in Como, 1779 in Padua berufen, wandte er sich ihnen erneut zu. Dabei entwickelte und verbesserte er selbst die Werkzeuge zur Erforschung der elektrischen Erscheinungen.

So konstruierte er den Elektrophor. In dieser sehr einfachen Einrichtung (sie war unabhängig von *Volta* bereits auch von anderen vorgeschlagen worden) wurde die sogenannte Influenz erstmals zur Erzeugung von Elektrizität genutzt. Bis weit in das 19. Jahrhundert durfte der leicht zu handhabende, robuste und zuverlässige Elektrophor in keinem physikalischen Kabinett fehlen. Außerdem bildete er den Ausgangspunkt für die Entwicklung der Influenzmaschinen, leistungsfähiger Elektrisiermaschinen, die für viele Versuche unentbehrlich waren.

Der Elektrophor – einer der ältesten »Elektrizitätserzeuger«. Wird bei abgehobener oberer Metallscheibe 2 die Platte durch Reiben elektrisch geladen und anschließend die obere Scheibe wieder aufgelegt, kommt es in dieser durch Influenz zur Ladungstrennung. Wird durch Berühren der Scheibe die Ladung eines Vorzeichens zur Erde abgeleitet, steht die Ladung des anderen Vorzeichens für Experimente zur Verfügung

1 Isoliergriff; 2 Metallscheibe;
3 Platte aus Hartgummi, Glas o. ä.;
4 Metallscheibe



Um Experimente deuten und aufwerten zu können, mußten sich auch geringe Elektrizitätsmengen nachweisen und messen oder wenigstens abschätzen lassen. *Volta* verbesserte das Elektroskop, ein einfaches Nachweisinstrument für elektrische Ladungen, das im wesentlichen aus zwei sich je nach ihrer Ladung abstoßenden und damit spreizenden, leitenden Blättchen bestand: Er versah es zusätzlich mit einem Kondensator, der nacheinander zugeführte Ladungen speicherte, sozusagen addierte, bis sie einen deutlichen Ausschlag der Blättchen hervorriefen. *Volta* gehörte zu den Physikern, die nicht an eine spezifische »tierische« Elektrizität glaubten. Daraus erklärt sich, daß er *Galvanis* Arbeiten von Anfang an skeptisch gegenüberstand. Im Frühjahr 1792 begann er, *Galvanis* Versuche zu wiederholen. Ihre Resultate überraschten ihn zunächst so, daß er, wie in einem Briefe an *Galvani* nachzulesen ist, »vom Unglauben zum Fanatismus«, das heißt zu *Galvanis* Ansichten, bekehrt wurde.

Sein kritischer Sinn allerdings blieb wach. So forderte er in seinen Vorlesungen – trotz zunächst uneingeschränkten Lobes für *Galvanis* Experimente – immer wieder eine genaue, vor allem zahlenmäßige Prüfung aller Resultate.

»Wie« – so ungefähr drückte er es aus – »soll man die Ursachen von Erscheinungen aufdecken, wenn es nicht gelingt, diese nach Qualität und Quantität zu beschreiben?«

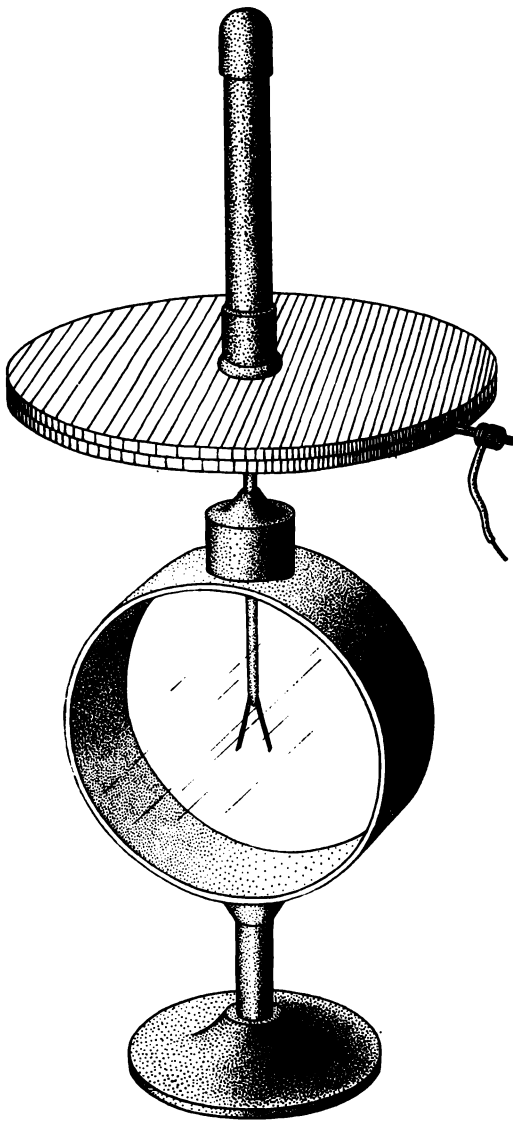
Volta führte eine Reihe weiterer Versuche aus, benutzte dazu Elektroskope eigener Konstruktion und solche anderer und – stieß auf Widersprüche zu den Lehren *Galvanis*. Die Ladungen von Muskeln und Nerven zeigten nicht in jedem Falle die von *Galvani* behaupteten Vorzeichen; diese hingen vielmehr auch von den zur Anwendung kommenden Metallen ab. Hatten die Metalle, so fragte sich *Volta* bald, vielleicht doch eine größere Bedeutung, als *Galvani* ihnen zugebilligt hatte? Es gab fast vergessene Berichte, die diese Annahme stützten. Um 1750 hatte der deutsche Gymnasiallehrer *Johann Georg Sulzer*, (1720 bis 1779) seine Zungenspitze zwischen ein Stück Blei und ein Stück Silber gebracht, die sich an den Rändern berührten. Er empfand dabei ein »Prickeln« und einen säuerlichen Geschmack, *Sulzer* hielt die Vereinigung von Blei und Silber für die Ursache einer Teilchenbewegung, die die Nerven der Zunge erregte und so den Geschmack hervorriefe.

Einen ähnlichen Versuch stellte *Volta* an: Er legte einen Stanniolstreifen auf die Zungenspitze, eine Silbermünze auf den Zungenrücken. Ein Kupferdraht verband die Metalle. Solange die Verbindung bestand, empfand *Volta* einen säuerlichen Geschmack, und zwar auch dann, wenn die Metalle ohne den verbindenden Kupferdraht direkt miteinander in Berührung gebracht wurden.

Diese Beobachtung und andere, ähnliche, waren mit *Galvanis* Versuchen und Schlußfolgerungen kaum in Einklang zu bringen. Immer eindringlicher stellte sich *Volta* die Frage:

Sind die Metalle wirklich nur, wie *Galvani* schreibt, Leiter der Elektrizität? Deutete nicht alles daraufhin, daß sie selbst maßgeblich an den Vorgängen teilhaben, vielleicht im eigentlichen Sinne die Erreger der Elektrizität darstellten, während die Nerven selbst passiv waren? Muskelzucken, säuerlicher Geschmack wären dann nur Folgeerscheinungen der Elektrizität.

Galvani hatte experimentiert – nur wiederholte, eindeutige Experimente konnten die aufgeworfenen Fragen beantworten. Jahrelang beschäftigt sich *Volta* mit ihnen.



Elektroskop mit Kondensator (nach einer Skizze Voltas)

Das Ziel aber war ein anderes geworden: Es kam nicht mehr darauf an, *Galvani* zu bestätigen, sondern herauszufinden, ob er sich irrte oder nicht.

Volta stellte fest, daß sich *ein* Leiter durch Holzkohle ersetzen läßt. Er untersuchte die unterschiedlichsten Leiterkombinationen auf ihre Wirkungen und stellte eine erste Spannungsreihe auf, in die die Leiter so eingeordnet waren, daß zwei von ihnen eine um so stärkere Wirkung auslösten, je weiter sie auseinanderstanden.

1794 war sich *Volta* seiner Sache sicher. Offen trat er gegen die Hypothese von der »tierischen« Elektrizität auf. In den Metallen, die durch einen feuchten Stoff

in Verbindung gebracht wurden, lagen die Antriebskräfte für die Elektrizität; Muskeln und Nerven dienten lediglich als Leiter und zugleich als Anzeigeeinstrument.

Es gehörte Mut dazu, eine derart kühne Annahme in einer Zeit auszusprechen, in der die Lehre von der »tierischen« Elektrizität mehr Anhänger als Gegner hatte und außer von *Galvani* auch von zahlreichen anderen Wissenschaftlern energisch vertreten wurde. Dieser Mut jedoch wäre vertan gewesen, hätte *Volta* nicht bewiesen, daß man Muskeln und Nerv entbehren konnte. Das zu zeigen war sein nächstes Ziel.

Das hieß zunächst, auf das »Anzeigeeinstrument Froschschenkel« verzichten und eine andere Meßvorrichtung an seine Stelle setzen. *Volta* selbst hatte sie vorgeschlagen und ausgeführt: Das verbesserte Elektroskop, mit einem Kondensator ausgestattet, stand dem Froschschenkel an Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit nicht nach.

Auch ein unerwartetes Resultat stellte sich ein. Man konnte sogar ohne den feuchten Leiter auskommen. Elektrische Erscheinungen machten sich bereits dann bemerkbar, wenn zwei verschiedene, miteinander in inniger Berührung stehende Leiterflächen plötzlich getrennt wurden.

*Volta*s Versuchseinrichtung war ebenso einfach wie sinnreich. Die der Ladungsanzeige dienenden Blättchen des Elektroskops wurden mit einer polierten Metallplatte verbunden, der eine zweite, aus einem anderen Leitermaterial bestehend und mit einem Isoliergriff versehen, auflag. Wurde die zweite Platte rasch abgehoben, spreizten sich die Blättchen des Elektroskops und zeigten so das Vorhandensein einer Ladung an.

Der Grad der Spreizung diente *Volta* als Maß der bei der Plattentrennung erzeugten Elektrizitätsmenge. Ob die Elektroskopplatte eine negative oder positive Ladung erhalten hatte, stellte er durch geriebene Glas- bzw. Harzstäbe fest. Die Ladungen von Stab und Elektroskop hatten gleiche Vorzeichen, wenn sich die Blättchen bei der Berührung durch die zusätzliche Ladungszufuhr weiter auseinander spreizten, sie hatten verschiedene Vorzeichen, wenn sie sich einander näherten und damit die Kompensation eines Teils der Ladung anzeigten.

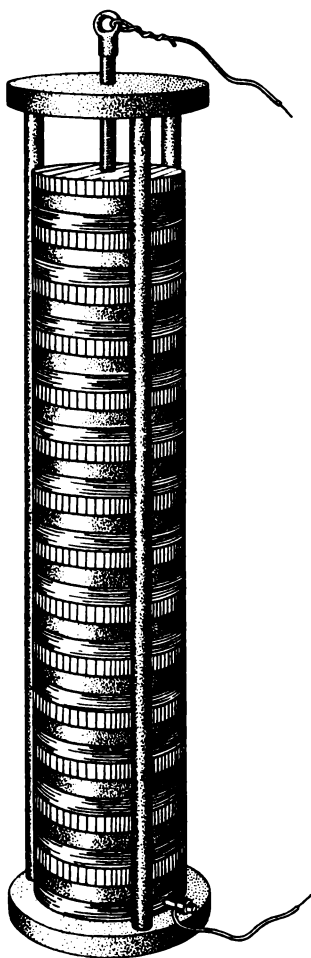
Bald stellte *Volta* fest, daß die »elektrische Kraft« nicht nur an der Berührungsstelle von zwei Metallen, sondern auch an der Grenze zwischen Metall und einer leitenden Flüssigkeit auftrat. 1796 schrieb er:

»Die Berührung verschiedener Leiter, die ich trockene Leiter oder Leiter der ersten Klasse nenne, mit feuchten oder Leitern der zweiten Klasse erregt das elektrische Fluidum und gibt ihm einen gewissen Antrieb.«

Von dieser Beobachtung führte ein gerader Weg zu *Volta*s wichtigster Erfindung, der Voltaschen Säule, der aus galvanischen Elementen bestehenden Batterie, die uns heute in jeder Taschenlampenbatterie und als Stromquelle Tausender elektrischer und elektronischer Geräte begegnet.

Im Frühjahr 1800 – *Galvani* hat diesen Todesstoß gegen seine Vorstellungen nicht mehr erlebt – richtet *Volta* einen Brief an den Präsidenten der Royal Society (Royal Society, Königliche Gesellschaft, eine 1663 in London gegründete wissenschaftliche Institution), in dem er Wirkung und Aufbau seiner Säule beschrieb:

»Ich verschaffte mir einige Dutzend kleine, runde Platten oder Scheiben aus 59



Voltasche Säule, erste Quelle für
stetig fließenden Strom

Kupfer oder besser aus Silber, von etwa einem Zoll Durchmesser, und eine ebenso große Zahl Zinn- oder weit besser Zinkplatten, von etwa derselben Form und Größe. Außerdem stellte ich eine genügende Anzahl von Scheiben aus Pappe oder Leder oder einer anderen porösen Substanz her, die imstande ist, viel von der Flüssigkeit aufzusaugen und festzuhalten, mit welcher sie durchtränkt sein müssen, damit die Versuche gelingen . . .

Ich lege horizontal auf einen Tisch oder auf eine beliebige Unterlage eine der metallischen Platten, zum Beispiel eine Silberplatte, und bedecke sie mit einer Platte von Zink. Hierüber schichte ich eine der durchweichten Scheiben, dann eine zweite Silberplatte, auf diese folgt sofort eine andere von Zink, auf welche ich wiederum eine durchweichte Scheibe folgen lasse . . .

Sobald die Säule etwa 20 solcher Stockwerke oder Metallpaare enthält, wird sie schon den Fingern, mit denen man ihre Enden berührt, einen oder mehrere kleine Erschütterungsschläge zu erteilen vermögen . . . Jeder dieser Schläge gleicht voll-

kommen jener, leichten Erschütterung, die eine schwach geladene Leidener Flasche oder ein aufs äußerste erschöpfter Zitterrochen zu erteilen vermögen.«

Volta's Brief, in den »Philosophical Transactions« abgedruckt, erregte Aufsehen und hatte zahlreiche Versuche, Untersuchungen, Hypothesen, Theorien, vor allem aber handfeste Resultate zur Folge.

Was ist denn, so fragten Nichtfachleute, eigentlich so aufsehenerregend an der *Volta'schen* Säule? Sie ist doch geradezu lächerlich einfach; jeder kann sie zusammensetzen, der über Münzen aus verschiedenen Metallen und über eine Schere verfügt, um Papp- oder Lederscheiben rund zu schneiden.

Auch die Wirkungen der *Volta'schen* Säule sind, verglichen mit denen einer Batterie Leidener Flaschen oder einer Elektrisiermaschine, eher unauffällig: Fünkchen statt des knallenden Funkens der sich entladenden Leidener Flasche, ein Kribbeln, allenfalls ein Schmerz statt eines Schlages, »als wenn man durch eine Mühle gedreht würde«.

Die sich mit der Erforschung der Elektrizität beschäftigten, wußten es besser:

Jede Leidener Flasche mußte geladen werden, ehe sie in Tätigkeit treten konnte. *Volta's* Säule war jederzeit betriebsbereit, solange die Zwischenscheiben feucht und die Metalle nicht zersetzt waren. Die Entladung einer Leidener Flasche erfolgte schlagartig, allenfalls in mehreren, an Intensität rasch abnehmenden »Stößen«. Die *Volta'sche* Säule lieferte ununterbrochen, stetig Elektrizität. *Volta* stellte das auf (für Leser des 20. Jahrhunderts) geradezu naive Weise fest.

»Ich fühle in dem Augenblicke, in welchem der leitende Kreis geschlossen wird, an der berührten Stelle der Haut und ein wenig darüber hinaus einen Schlag und einen Stich, wie man den Kreis öffnet und schließt. Wenn dieser Wechsel häufig stattfindet, so ruft er ein sehr unangenehmes Prickeln und Stechen hervor. Bleibt jedoch die Verbindung bestehen, ... entsteht in dem von dem Drahtende berührten Körperteil ... ein Brennen, das nicht nur andauert, sondern immer stärker und schließlich unerträglich wird und erst aufhört, wenn man den Kreis unterbricht. Welch ein augenscheinlicher Beweis dafür, daß der elektrische Strom andauert, solange die leitenden Substanzen in Verbindung stehen.

Daß das elektrische Fluidum unaufhörlich kreist, kann paradox erscheinen und unerklärlich sein. Nichtsdestoweniger ist es tatsächlich so; es läßt sich tatsächlich mit den Händen greifen.«

Das unaufhörlich kreisende elektrische Fluidum, den elektrischen Strom nicht nur gefunden, sondern zugleich Möglichkeiten aufgedeckt zu haben, ihn nach Bedarf auf einfache Weise jederzeit zu gewinnen, ist *Volta's* große Leistung. Er schuf, mit heutigen Worten ausgedrückt, die erste ständig fließende Stromquelle.

Eine solche Stromquelle brauchte man, um die Wirkungen der Elektrizität systematisch zu erforschen und vielleicht weitere zu finden, die verborgen blieben, solange man auf Elektrisiermaschine, Elektrophor und Leidener Flasche angewiesen gewesen war.

Man benötigte sie noch dringender zur Beantwortung der Frage, ob sich – im Zeitalter der industriellen Revolution – mit der Elektrizität »etwas anfangen ließe«, ob sie technisch und wirtschaftlich nützliche Möglichkeiten eröffnete. *Volta* und viele seiner Kollegen gingen zunächst daran, die neuen Elektrizitätserzeuger zuverlässiger und leistungsfähiger zu gestalten.



Voltas Becherapparat, eine Reihenschaltung galvanischer Elemente
A, B verschiedene Metalle, z. B. Kupfer und Zink; a metallische Verbindungen zwischen den Elementen

Die Säule wuchs um so mehr in die Höhe, je mehr Plattenpaare man übereinander setzte. Dadurch wurden aber die unteren Zwischenscheiben so zusammengedrückt, daß sie ihre Feuchtigkeit rasch verloren; die Säule versagte.

Volta löste das Problem durch Unterteilen der Säule. Er stellte die Teilstücke nebeneinander und verband sie durch Drahtstücke, schaltete also, in heutigen Worten ausgedrückt, die einzelnen Batterien in Serie. Andere kippten die Säule um 90° und brachten ihre nunmehr senkrecht stehenden Platten in einem geeigneten Gestell unter.

Später ließ Volta die Zwischenscheiben weg. An ihre Stelle trat jeweils ein mit einer leitenden Flüssigkeit gefüllter Becher, in den Streifen aus verschiedenen Metallen tauchten. Daraus entwickelten sich die zahlreichen »galvanischen« Elemente, gleich in ihrer Wirkungsweise, unterschiedlich nach Art der verwendeten Leiter, ihrer Anordnung, Größe, Gestalt sowie nach der sie umgebenden Flüssigkeit.

Eine Liste aller Elemente, damals aufgestellt, hätte über 100 Positionen aufgeführt. Doch nur wenige erlangten bleibende Bedeutung, wie das Zink-Kohle-Element, das heute die meisten Taschenlampen speist.

Die zahlreichen Leiter- und Flüssigkeitskombinationen, mit deren Hilfe sich elektrischer Strom gewinnen ließ, warfen neue Fragen auf:

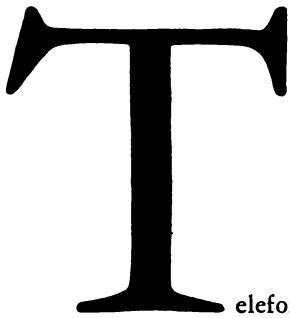
Wie hingen die Abmessungen, wie die Konstruktion, das Material einer Volta'schen Säule mit ihren Wirkungen zusammen? Ließ sich »mehr erreichen«, wenn man viele Paare kleiner oder wenn man wenige Paare großer Platten zur Batterie vereinte?

Die Resultate waren zunächst recht widersprüchlich. Eine Säule aus 40, 50 oder mehr Paaren kleiner Platten versetzte dem, der ihre Enden berührte, einen empfindlichen Schlag; eine Säule aus 5 Paaren großflächiger Platten übte keinerlei fühlbare Wirkung aus. Verband man jedoch eben diese Säule mit einem Draht, begann er zu glühen, während die aus Dutzenden kleiner Platten zusammengesetzte Säule allenfalls einen sehr dünnen Draht ein wenig erwärmte.

Ähnliche schwierig zu deutende Beziehungen ergaben sich, als man den ebenfalls in dieser Zeit gefundenen chemischen Wirkungen des elektrischen Stroms nachspürte. Es zeigte sich, zum Beispiel bei der »Zerlegung« von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff, daß Plattengröße und Plattenzahl sich recht unterschiedlich auswirkten.

Auch stellte sich heraus, daß manche Leiter den Strom gut, andere hingegen weniger gut hindurchfließen ließen, daß also der Leiter dem elektrischen Strom einen Widerstand entgegensetzte, der, wie aus Versuchen hervorging, vom Material, vom Durchmesser und von der Länge abhing.

Viele Physiker unterzogen sich der Aufgabe, dieses Beobachtungsmaterial zu sichten, zu ordnen und in sinnvollen Zusammenhang zu bringen. Hier sei nur *Georg Simon Ohm* (1787 bis 1854) genannt, dessen Namen jeder Schüler kennt. Seine 1827 erschienene Arbeit »Die galvanische Kette mathematisch behandelt« unterscheidet und verknüpft elementare Begriffe, die man zur eindeutigen Beschreibung des Stromflusses braucht. Das Ohmsche Gesetz zählt seitdem zu den unentbehrlichen Grundlagen der Elektrotechnik.



Drabt und Nadel

Telefon: Letzten Endes verdanken wir einigen Gramm Eisen und einigen Gramm Kupfer, sinnvoll zu einem Elektromagneten zusammengefügt, daß der Fernsprecher klingelt.

Wir sprechen mit unserem Partner. Daß wir seine Stimme hören können, verdanken wir wieder nur wenigen Gramm Eisen und wenigen Gramm Kupfer, sinnvoll zu einem Elektromagneten zusammengefügt.

Daß unser Gesprächspartner durch Wählen der Rufnummer unter Millionen Fernsprechteilnehmern gerade uns erreicht, ist unter anderem das Verdienst von... aber wir wissen bereits, wie es weitergehen müßte.

Folgerung: Ohne Elektromagneten wäre die Fernsprechtechnik nicht Wirklichkeit geworden.

Nur die Fernsprechtechnik?

Ohne Kenntnis der elektromagnetischen Erscheinungen könnten wir weder Telegramme noch Fernschreiben befördern; es gäbe weder einen Lautsprecher noch ein Tonbandgerät, weder Generationen empfindlicher Meßinstrumente noch die Tausende Tonnen schweren Riesenapparaturen der Kernforschungsinstitute. Steuerungs- und Regelungstechnik hätten ihren heutigen Stand nicht erreichen können.

Doch selbst wenn wir auf dies alles (und noch viel mehr) verzichten wollten oder auch nur könnten: Ohne Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen wären Kraftwerk, Elektromotor, Energieübertragung und damit die gesamte moderne Industrie Wunschtraum geblieben.

Die Geschichte des Elektromagnetismus begann mit einem stromdurchflossenen Draht und einer Kompaßnadel – vor wenig mehr als 160 Jahren.

Niemand weiß, wann die magnetischen und wann die elektrischen Kräfte entdeckt wurden. Als jedoch in Europa die Eigenschaft geriebenen Bernsteins und anderer Stoffe, leichte Teilchen anzuziehen, Anlaß zu mancherlei Spekulationen gab, orientierte man sich im fernen Asien auf weiten Land- und Wasserwegen bereits nach dem »Südweiser«, einem Vorläufer des Magnetkompasses.

Woher die merkwürdigen Eigenschaften von Bernstein und »magnetischen« Steinen rührten, ob es sich hier um ähnliche, gleiche oder aber um grundverschiedene Naturkräfte handelte, wußte niemand.

William Gilbert (1540 bis 1603), englischer Arzt und Physiker, war der erste, der magnetische und elektrische Erscheinungen klar gegeneinander abgrenzte:

»Der Magnet wirkt... nur auf magnetische Körper, während elektrische Substanzen alles anziehen. Auch vermag der Magnet bedeutende Lasten zu tragen,

während der elektrisierte Körper nur sehr kleine Gewichte (heute würden wir Massen sagen) anziehen vermag.«

Um 1600 brachte *Gilbert* diese Sätze zu Papier. Rund eineinhalb Jahrhunderte danach vertrat der Physiker *Franz Maria Ulrich Theodor Äpinus* (1724 bis 1802) einen entgegengesetzten Standpunkt:

»Wir sehen, daß die Ähnlichkeit der elektrischen mit den magnetischen Erscheinungen so groß ist, daß sie fast nicht größer sein kann. Was hindert uns also, nicht auch ähnliche Ursachen beider Kräfte anzunehmen, da es doch wahrscheinlich ist, daß die Natur ähnliche Erscheinungen auf eine ähnliche Weise hervorbringt.«

An der Wende zum 19. Jahrhundert und in den Jahren danach neigte man mehr der zweiten Ansicht zu.

Inzwischen war bekannt, daß für die Anziehungskräfte zwischen Massen, Magnetpolen und elektrischen Ladungen Gesetze galten, deren mathematische Fassungen sich sehr ähnlich sahen. Das bekräftigte den Gedanken des Zusammenhangs aller Naturkräfte, wie er sich zum Beispiel für Wärme und Bewegung offenbarte (s. S. 75) und wie ihn besonders auch die Beschäftigung mit der Elektrizität immer deutlicher zutage treten ließ.

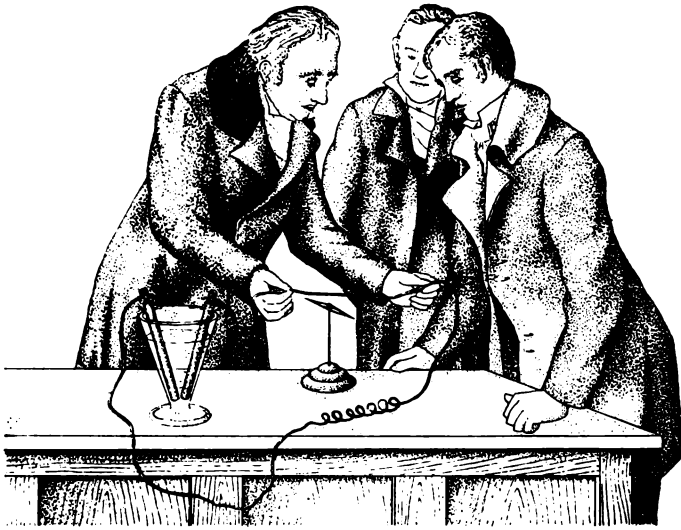
Wechselwirkungen zwischen elektrischen und chemischen Erscheinungen zeigten *Volta's* Säule und die mit ihr angestellten Versuche. Drähte erhitzen sich durch den Stromfluß, der Lichtbogen erstrahlte in bisher nie künstlich erzeugter Helligkeit. Sollte ausgerechnet der Magnetismus, dessen Wirkungen an die der Elektrostatik erinnerten, eine Ausnahme bilden und keine Beziehungen zur Elektrizität haben?

Es gab Indizien, daß dies nicht so war: Berichte, nach denen Kompaßnadeln durch Blitzschlag »ummagnetisiert« worden waren und von da ab in die falsche Richtung zeigten, Mitteilungen über Nägel und Werkzeuge aus Stahl, die sich als magnetisch erwiesen, nachdem in der Nähe ein Blitz eingeschlagen hatte, waren nicht anzuzweifeln.

Franklin hatte um 1750 Stahlstückchen durch die Entladung einer Batterie Leidener Flaschen magnetisiert; *Humphry Davy* (1778 bis 1829) zeigte, daß der elektrische Lichtbogen durch einen Magneten beeinflußt wird – je nach der Stromrichtung weicht er einem nahen Magnetpol aus oder wird von diesem angezogen.

Hier übte der Magnet also unmittelbar Kräfte auf einen elektrischen Strom aus, wie er von einer Batterie galvanischer Elemente geliefert wurde. Galt das auch umgekehrt? Wirkte nicht nur der »Schlag« des Blitzes oder einer Leidener Flasche auf Magneten, sondern auch der Strom etwa einer *Volta'schen* Säule?

Dieser Frage gingen viele Forscher nach. Der dänische Physiker *Hans Christian Oersted* (1777 bis 1851) fand die Antwort. *Oersted*, der später in seiner Heimatstadt Kopenhagen die Gründung einer Polytechnischen Hochschule anregte und durchsetzte (er leitete sie bis zu seinem Tode), interessierte sich bereits als junger Naturwissenschaftler für die Arbeiten von *Galvani* und *Volta*. Auf mehrjährigen Studienreisen in Frankreich und Deutschland lernte er viele bekannte Naturwissenschaftler kennen, unter anderen *Johann Wilhelm Ritter* (1776 bis 1810), der gleichfalls auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre arbeitete. *Ritter* und *Oersted* versuchten bereits 1801, Zusammenhänge zwischen Magnetismus und Elektrizität aufzudecken – wenn auch ohne Erfolg.



Oersted demonstriert die Ablenkung der Magnetnadel durch elektrischen Strom

Trotzdem blieb *Oersted* diesem Thema 18 Jahre lang treu, auch wenn er es nicht unmittelbar bearbeitete. Im Winter 1819/20 beobachtete er bei Vorlesungsversuchen, daß eine Magnetnadel immer ausschlug, wenn und solange ein nahe vorbeiführender Draht mit einer galvanischen Batterie verbunden wurde.

Einschalten: Die Nadel wich aus ihrer Nord-Süd-Richtung aus und kam nach einigem Hin- und Herschwingen zur Ruhe. Ausschalten: Die Nadel kehrte in die Normallage zurück. Wurden die Anschlüsse an der galvanischen Batterie vertauscht oder der Draht statt unter über der Nadel vorbeigeführt, schlug sie nach der anderen Seite aus.

Das war der Zusammenhang zwischen magnetischen und elektrischen Erscheinungen, nach dem *Oersted* und *Ritter* (sowie viele ihrer Kollegen) gesucht hatten.

Man hat, wie bei *Galvani*, über den »Ruhm des Entdeckers« gestritten. War es nicht nur ein glücklicher Zufall, der *Oersted* berühmt werden ließ? Hatte wirklich er die Nadel zuerst zucken sehen oder sein Gehilfe oder vielleicht sogar ein Student, den die Magnetnadel mehr interessierte als die Vorlesung?

Wir wissen heute, wie müßig solche Streitereien sind. Nicht wer das Zucken der Magnetnadel sah, brachte die Wissenschaft voran, sondern wer dieser Beobachtung nachging. Das aber war *Oersted*, der forschende, mit dem Problem vertraute Physiker.

Oersted untersuchte die beobachteten Erscheinungen nach allen Richtungen. Er stellte fest, daß das Material des Leiters keine Rolle spielte; insbesondere mußte es kein magnetisierbarer Stoff sein. Messing, Eisen, Zinn, mit Quecksilber gefüllte Röhren hatten die gleiche Wirkung, solange sie vom Strom durchflossen wurden.

Die Nadel wich auch aus, wenn man zwischen sie und den Leiter andere Stoffe, Glas, Wasser, Stein, Harz, brachte. Selbst in einer mit Wasser gefüllten Büchse wurde die Magnetnadel abgelenkt.

In einer kaum vier Seiten umfassenden Mitteilung, die er an Kollegen, Universitäten, Akademien verschickt, berichtet *Oersted* über seine Beobachtungen und

Versuche: »Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam« – »Versuche über die Wirkung des elektrischen Stromes auf die Magnetnadel«. Beinahe übersehen wurde – so interessant waren die Experimente – eine Bemerkung *Oersteds*:

»Daß der elektrische Strom nicht in dem leitenden Draht eingeschlossen, sondern zugleich in dem umgebenden Raume ziemlich weithin verbreitet ist, ergibt sich hinlänglich aus den angeführten Beobachtungen.«

Läßt sich dieser Hinweis anders deuten als so, daß *Oersted* zumindest ahnte, was als Begriff in den kommenden Jahrzehnten nicht nur die Elektrizitätslehre, sondern die gesamte Physik unter ganz neuen Gesichtspunkten zu betrachten ermöglichte: das elektromagnetische Feld?

Oersted hatte gefunden, daß die Wirkung auf die Magnetnadel von der Stromstärke und von der Entfernung zwischen Leiter und Nadel abhängt, und hatte die Beziehungen zwischen Stromrichtung und Drehsinn der Nadelablenkung untersucht. Eine überzeugende Erklärung für die beobachteten Erscheinungen konnte er jedoch nicht geben.

Wie zuvor bei *Galvani* und *Volta* setzte unmittelbar nach Bekanntwerden der *Oerstedschen* Entdeckung überall eine Fülle von Untersuchungen ein; denn zahlreiche oder vielmehr die meisten Fragen waren noch offen. An ihrer Beantwortung haben vor allem französische Physiker Anteil: *Dominique François Arago* (1786 bis 1853), *Jean Baptiste Biot* (1774 bis 1862), *Félix Savart* (1791 bis 1841), vor allem aber *André Marie Ampère* (1775 bis 1836).

Nach welcher Richtung lenkte ein stromdurchflossener Draht die Magnetnadel ab? Das hing, schon *Oersted* hatte es bemerkt, nicht nur von der Stromrichtung, sondern auch von der Lage der Magnetnadel gegenüber dem Draht ab. Es dauerte nicht lange, und man hatte einfache Regeln aufgestellt, die heute jeder Elektrotechniker kennt und benutzt.

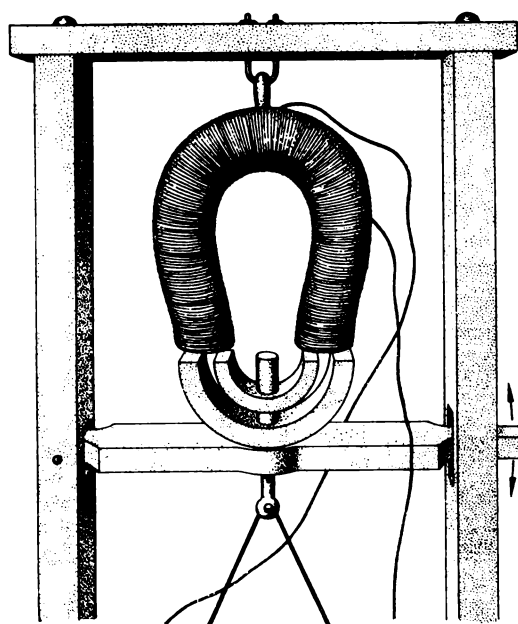
Die Magnetnadel wurde um so stärker abgelenkt, je näher sie dem stromführenden Draht war. Konnte man nicht *einen* Draht mehrfach wirken lassen? Man versuchte es, indem man den Draht zu einer Spule – »Solenoid« hieß es damals – aufwickelte. Die Vermutung bestätigte sich, die Wirkungen stiegen mit der Windungszahl der Spule.

Gab es auch im Innenraum einer Spule magnetische Wirkungen? Zahlreiche Physiker kamen zu gleichen Resultaten:

Legt man in eine stromdurchflossene Spule ein Stück Eisen, zum Beispiel einen Stab, einen Draht oder ein Drahtbündel, vervielfachen sich die magnetischen Wirkungen. Bringt man Stahl in das Spuleninnere, wird dieser, auch wenn er vorher unmagnetisch war, zum Dauermagneten.

Die verstärkende Wirkung der Eisendrähte hielt nur an, solange Strom durch die Spule floß. Stahl dagegen bewahrte den größten Teil des ihm »künstlich« erteilten Magnetismus. Können wir, die wir täglich mit Elektromagneten zu tun haben, wirklich ermessen, was diese Ergebnisse bedeuteten?

Man konnte »Elektromagneten« bauen, die nur als Magnet wirkten, solange sie von einem Strom durchflossen wurden. Ihre Anziehungskraft hing überdies davon ab, wie stark der sie durchfließende Strom war oder wie viele Windungen ihre Spule hatte, und sie vertauschten ihre Pole, wenn man die Stromrichtung umkehrte.



Einer der ersten leistungsstarken Elektromagneten

Man konnte Dauermagneten herstellen, indem man einen Stahldraht oder -stab in eine stromdurchflossene Spule brachte. Welch einfache Methode gegenüber den vorher üblichen Verfahren, Stahl immer wieder und in vorgegebener Richtung mit einem »natürlichen« Magneten zu bestreichen!

Was dies für die Technik bedeutete, haben wir am Anfang des Abschnitts anzudeuten versucht – »versucht« deshalb, weil es den Umfang selbst des dickleibigsten Buches überschreiten würde, auch nur aufzuzählen, welche Auswirkungen der Elektromagnet hatte.

Physiker haben das zu jener Zeit nicht ahnen können. Aber schon sehr bald erkannten sie eine Anwendungsmöglichkeit des Elektromagnetismus: Jetzt konnte man Meßinstrumente bauen – zuverlässig, genau, relativ einfach in der Konstruktion und unentbehrlich für den weiteren Fortschritt der physikalischen Forschung. Galvanometer, aus Spule und Magnetnadel bestehend, machten den Anfang, wichen der genaueren »Tangentenbussole«, wurden abgelöst durch Instrumente für Spannungs- und Strommessungen, die bald auch auf mehrere Meßbereiche umgeschaltet werden konnten.

Wie weit reichen die Beziehungen zwischen magnetischen und elektrischen Vorgängen? Trennt eine Grenzlinie beide, gehen sie allmählich ineinander über, sind beide vielleicht nur verschiedene Erscheinungsformen ein und derselben Naturkraft? Kann man, auf den einfachsten Nenner gebracht, sagen: stromführender Leiter = Magnet?

Dies vermuteten besonders *Louis-Joseph Gay-Lussac* (1778 bis 1850), bekannt durch seine Arbeiten zur Physik der Gase, und *Thomas Johann Seebeck* (1770 bis 1831), dem wir die Entdeckung der Thermoelektrizität verdanken. Bei seinen

Versuchen wandte schon *Seebeck* die noch heute übliche Methode an, magnetische Kräfte auf möglichst anschauliche Weise sichtbar werden zu lassen.

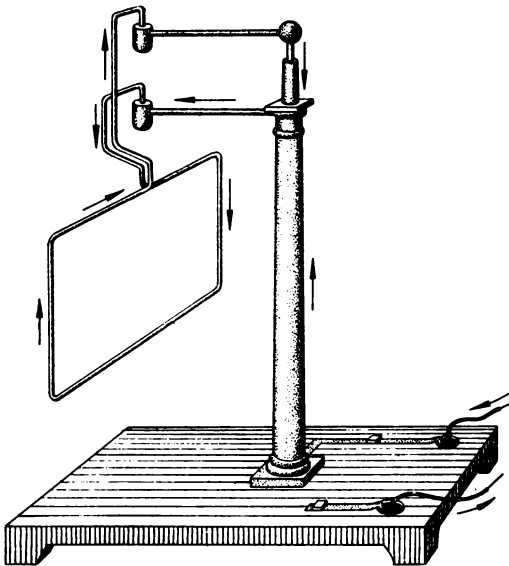
Er streute Eisenfeilspäne auf ein Kartonblatt, durch das senkrecht zur Kartonebene die stromführenden Leiter gesteckt wurden. Die Späne ordneten sich linienförmig an – zu konzentrischen Kreisen bei einem Leiter, zu langgestreckten Ovalen bei einer stromdurchflossenen Spule. Es entstanden Feldlinienbilder, die denjenigen völlig entsprachen, die man auch mit einem Dauermagneten erhalten konnte. Jeder kennt sie heute aus dem Physikunterricht oder aus Lehrbüchern. Dabei nahm auch *Seebeck*, wie schon *Oersted*, in der »magnetischen Atmosphäre«, die er um jeden Leiter und um jeden Magneten vermutete, Gedanken vorweg, ähnlich denjenigen, die später von *Faraday* zu dem wichtigen Begriff des elektrischen und des magnetischen Feldes ausgebaut wurden.

Besonders eingehend befaßte sich *André Marie Ampère* mit den elektromagnetischen Erscheinungen. Sofort nach ihrem Bekanntwerden machte er sich daran, die Oerstedschen Versuche zu wiederholen, und fand die Schwimmerregel für die Richtung des Abweichens einer Kompaßnadel im Feld eines Stromleiters.

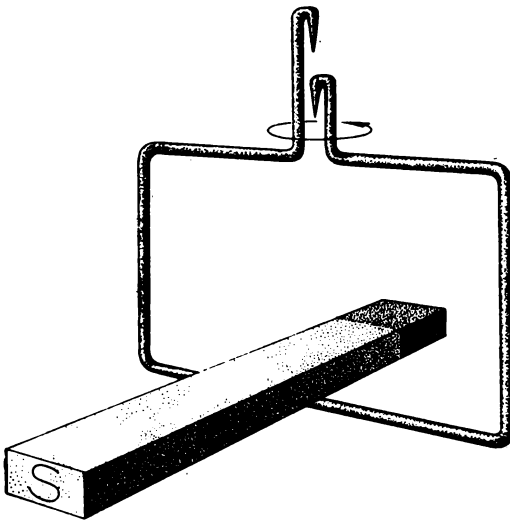
Wie verhielt sich ein beweglicher Leiter gegenüber einem ortsfesten Magneten? Vor Versuchen über diese Frage war ein technisches Problem zu lösen: Der Leiter mußte so angebracht werden, daß seine Bewegung weder durch Reibung noch durch die erforderlichen Stromzuführungen merklich behindert wurde.

Die Einrichtung, die *Ampère* entwarf und ausführte, war einfach und zweckmäßig.

Er bog den für die Versuche vorgesehenen Leiter zu einem Rechteck. In der Mitte der Oberseite winkelte er die Drähte um 90° ab und ließ sie, nach erneuter Biegung, diesmal um 180° , in Stahlspitzen auslaufen. Diese tauchten in zwei senk-



Ampères drehbare Leiterschleife



Drehbare Leiterschleife und
Stabmagnet

recht übereinander liegende Näpfchen voll Quecksilber, an die die stromliefernde Batterie angeschlossen war. Die gleiche Art der Stromzuführung wurde auch für andere Leiter, zum Beispiel für Spulen, angewandt.

Ein Teil der Experimente, die *Ampère* mit dieser Einrichtung anstellte, wird noch heute im Physikunterricht vorgeführt.

Stellte *Ampère* einen stabförmigen Magneten so wie im Bild vor die Leiterschleife und schaltete er den Strom ein, nahm die Schleife eine Stellung ein, bei der die Längsachse des Magneten senkrecht auf der Schleifenebene stand. Umkehrung der Stromrichtung oder Drehung des Magneten um 180° hatte ein Schwenken der Schleife um 180° zur Folge. Hätte man entsprechende Versuche mit zwei Magnetstäben statt mit einem Stab und der Schleife ausgeführt, wäre das Ergebnis gleich gewesen.

Ersetzte *Ampère* die Leiterschleife durch eine Spule, änderte sich nichts, Spulen- und Magnetachse stellten sich parallel.

Da ein stromführender Leiter sich »wie ein Magnet benahm«, mußte er durch das Magnetfeld der Erde beeinflusst werden.

Auch das bestätigte sich: Eine Leiterschleife oder Spule, um eine senkrechte Achse drehbar, bewegte sich bei Stromfluß in die Nord-Süd-Richtung und schwenkte um 180° , wenn man die Stromrichtung umkehrte. Bei waagerechter, in Ost-West-Richtung liegender Achse zeigte die Spule bzw. Leiterschleife das gleiche Verhalten wie eine Inklinationssnadel und stellte sich schräg zur Erdoberfläche ein.

Bei anderen Experimenten machte sich der Erdmagnetismus allerdings recht unangenehm bemerkbar. Wollte man zum Beispiel die ablenkenden Kräfte messen, die Ströme auf eine Magnetnadel ausübten, konnte man hierfür eine Kompaßnadel verwenden, die sich gegen die Rückstellkraft einer Spiralfeder drehte. Doch mußten dabei nicht nur die zu messenden, sondern auch die vom Erdmagnetismus ausgeübten Kräfte berücksichtigt werden. Das komplizierte die Ausführung von Messungen erheblich.

Durch einen Kunstgriff schaltete *Ampère* den Einfluß des Erdmagnetismus aus; er verband zwei gleiche Magnetnadeln durch eine gemeinsame Drehachse. Die Nadeln standen in geringem Abstand voneinander parallel, aber mit vertauschten Polen, Nordpol über Südpol, Südpol über Nordpol. Der Einfluß des Erdmagnetismus wurde dadurch ausgeschaltet.

Wie verhielten sich Spulen »unter sich«? Mit einer drehbaren und einer feststehenden Spule konnte es *Ampère* leicht untersuchen. Eine stromdurchflossene Spule hatte, wie jeder Magnet, einen Nord- und einen Südpol, gleichnamige Spulenpole stießen sich ab, ungleichmäßige zogen sich an. Einfache Leiterschleifen verhielten sich ebenso.

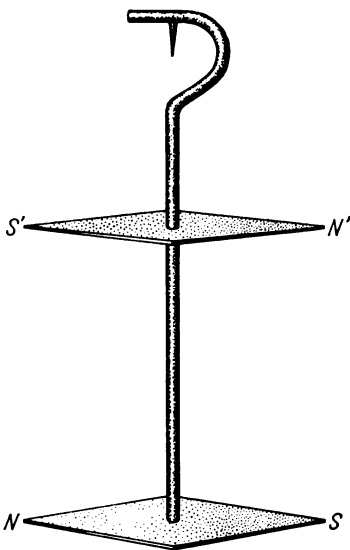
Auch das Verhalten geradlinig ausgespannter Drähte wurde untersucht. Resultat war die von *Ampère* formulierte Regel »parallel und gleichgerichtet fließende Ströme ziehen sich an, während parallel, aber entgegengesetzt fließende Ströme sich abstoßen«. Diese Erscheinung bildet heute unter anderem die Grundlage für die Festlegung der gesetzlichen Einheit der Stromstärke.

Die Summe aller Beobachtungen, Messungen, Versuche tilgte jeden Zweifel: Der Magnetismus stromdurchflossener Leiter und derjenige, den etwa ein Stück Eisen-erz zeigte, waren wesensgleich.

Nicht ausbleiben konnte, daß man sich nun fragte: Wie entsteht natürlicher Magnetismus, warum zum Beispiel wird ein Stück Stahl zum Dauermagneten, wenn man es in eine stromdurchflossene Spule legt?

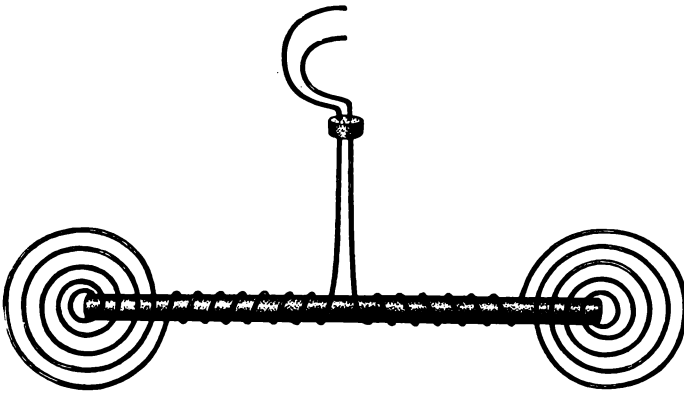
Daß sich die Längsachsen bzw. die Windungsebenen von stromdurchflossenen Spulen parallel zu stellen suchten, konnte man auch so beschreiben: Die in den Windungen kreisenden Ströme werden ausgerichtet und so orientiert, daß ihre Bahnen parallel zueinander verlaufen. Diese Deutung übertrug *Ampère* auf den natürlichen Magnetismus.

Auch in den kleinsten Teilchen eines Körpers, in seinen Molekülen, verursachen



Ampères astatische Nadeln schalten den Einfluß des Erdmagnetismus aus

Gegensinnig gewickelte Spulen – elektrische Variante Ampères zu seinen astatischen Nadeln



kreisende, parallel und gleichgerichtet fließende Ströme den Magnetismus. Sie fließen innerhalb der Moleküle, jedes Molekül ist ein winziger »Molekularmagnet«. Die Molekularmagneten liegen zunächst völlig regellos durcheinander; deshalb heben sich ihre magnetischen Wirkungen insgesamt auf.

Das ändert sich, sobald die Molekularmagneten und die sie verursachenden Ströme parallel gestellt werden. Wird zum Beispiel ein zunächst unmagnetischer Eisenstab in eine Spule gebracht, reagieren die in ihm fließenden Molekularströme ebenso, wie sich eine stromdurchflossene Spule verhalten würde. Ihre Ebenen stellen sich den Windungsebenen der erzeugenden Spule parallel, die Wirkungen der Molekularmagneten addieren sich, der Stab wird zum Magneten.

Bei manchen Stoffen, zum Beispiel Stahl, bleiben die Molekularmagneten ausgerichtet, bei anderen, zum Beispiel weichem Eisen, geht ihre Orientierung mehr oder weniger schnell wieder verloren. Man kann durch elektrischen Strom Stahl zu einem Dauermagneten machen, Eisen dagegen nicht. Erhitzt man einen Stahlmagneten bis zu einer bestimmten Temperatur, wird die innere Teilchenbewegung so heftig, daß die Molekularmagneten ihre Parallelstellung aufgeben müssen; der Magnetismus des Stabes erlischt.

Ampères Vorstellungen konnten nahezu alle magnetischen Erscheinungen erklären, unter anderem die seit vielen Jahrzehnten bekannte Tatsache, daß bei jeder Teilung eines Magneten stets vollständige kleinere Magneten entstanden und es niemals gelang, *einen* Magnetpol für sich zu erhalten.

Die Möglichkeit, seine Hypothese experimentell nachzuweisen, hatte *Ampère* noch nicht. Wir wissen heute, daß sie prinzipiell richtig war, auch wenn der Begriff des Molekularmagneten korrigiert werden mußte. Durch einen nicht einmal schwierigen Versuch läßt sich das Ausrichten der Elementarmagneten sogar hörbar oder auch sichtbar machen.

Wird in den Innenraum einer Spule mit vielen Drahtwindungen, deren Enden mit dem Eingang eines Tonfrequenzverstärkers verbunden sind, ein Weicheisendraht gelegt, und nähert man diesem einen Dauermagneten, so ist im Lautsprecher ein unregelmäßiges Knacken, oder Prasseln zu vernehmen. Ursache sind winzige Spannungsschübe, die beim Umlappen der Elementarmagneten in der Spule induziert werden.

Wir verdanken diesen Versuch dem viele Jahre eng mit der Technischen Hochschule (seit 1961 Technische Universität) Dresden verbundenen Physiker *Heinrich Barkhausen* (1881 bis 1956). Er fand durch Arbeiten und Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Elektronenröhren weltweite Anerkennung und wurde für sein Wirken, insbesondere für seine Bemühungen um den Wiederaufbau der durch anglo-amerikanische Bomber zerstörten Technischen Hochschule Dresden, mit dem Nationalpreis geehrt.

Ampère und seine Zeitgenossen hatten die Entdeckung *Oersteds* nach allen Richtungen durchleuchtet und ausgebaut. Die wichtigsten Grundlagen des Elektromagnetismus waren damit bekannt.

Strom übte chemische Wirkungen aus und konnte umgekehrt aus chemischen Vorgängen gewonnen werden, wie jedes galvanische Element bezeugte. Strom erzeugte Wärme – und gerade in jenen Jahren fand *Seebeck*, daß umgekehrt auch Wärme unmittelbar in Elektrizität verwandelt werden kann.

Gab es eine ähnliche Umkehrung für Elektrizität und Magnetismus? Genauer: Konnte nicht nur bewegte Elektrizität, elektrischer Strom, Magnetismus hervorrufen, sondern auch umgekehrt Magnetismus Elektrizität, elektrischen Strom?

Wenige Jahre später beantwortete *Michael Faraday*, einer der größten Physiker, diese Frage.

A

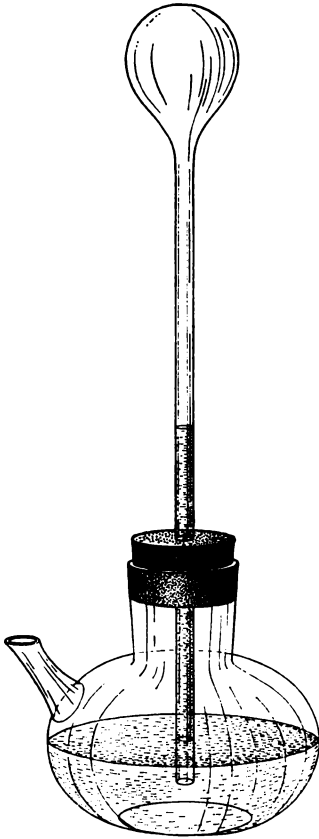
»Die größte Entdeckung des Jahrhunderts«

Is die entscheidenden naturwissenschaftlichen Leistungen des 19. Jahrhunderts nennt *Friedrich Engels* in seiner »Dialektik der Natur« die »Entdeckung der organischen Zelle durch *Schwann* und *Schleiden*«, »die Entwicklungstheorie, die zuerst von *Darwin* im Zusammenhang dargestellt und begründet wurde« und »die erste war der von der Entdeckung des mechanischen Äquivalents der Wärme . . . sich herleitende Nachweis der Verwandlung der Energie. Alle die zahllosen wirkenden Ursachen in der Natur, die bisher als sogenannte Kräfte ein geheimnisvolles, unerklärtes Dasein führten – mechanische Kraft, Wärme, Strahlung (Licht und strahlende Wärme), Elektrizität, Magnetismus, chemische Kraft der Verbindung und Trennung –, sind jetzt nachgewiesen als besondere Formen, Daseinsweisen einer und derselben Energie, d. h. Bewegung; wir können nicht nur ihre in der Natur stets vorgehende Verwandlung aus einer Form in die andre nachweisen, sondern sie selbst im Laboratorium und in der Industrie vorführen, und zwar so, daß einer gegebenen Menge von Energie in der einen Form stets eine bestimmte Menge von Energie in dieser oder jener anderen Form entspricht . . . Die Einheit aller Bewegung in der Natur ist nicht mehr eine philosophische Behauptung, sondern eine naturwissenschaftliche Tatsache.«

Über die Bedeutung dieser Tatsache müssen wir nicht viele Worte verlieren. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie, die »größte Entdeckung des Jahrhunderts«, wie *Justus von Liebig* sie nannte, wirkt überall und immer. Kein Physiker, kein Techniker kann oder darf es außer acht lassen, wenn Experimente und Hypothesen nicht scheitern, wenn Maschinen und Anlagen nicht versagen sollen. Was wir auch tun, nie können wir es umgehen, stets müssen wir es in unsere Überlegungen einbeziehen.

Zu den ältesten physikalischen Beobachtungen zählen Erscheinungen, die wir heute der Wärmelehre zuordnen: Körper erhitzen sich, wenn man sie aneinander reibt, dehnen sich bei Erwärmung aus und ziehen sich bei Abkühlung zusammen; Stoffe schmelzen oder verdampfen, je nachdem, wie Wärme auf sie einwirkt. Frühzeitig lernte man, diese Vorgänge auszunutzen – sei es zum Entzünden des lebensnotwendigen Feuers, zur Bereitung von Speisen, beim Gewinnen und Verarbeiten der Metalle.

Die Wissenschaft behandelte die Wärme lange recht stiefmütterlich. Zwar erfand man Thermometer und legte Temperaturskalen fest, unterschied nach zahlreichen Irrtümern und Umwegen Wärmemenge, Wärmekapazität und spezifische Wärme-



Galileis Thermoskop: Die Höhe der Flüssigkeitssäule im Rohr hängt von der Temperatur der darüber befindlichen, sich bei Erwärmung ausdehnenden Luft ab

kapazität; doch ein systematisches Eindringen in die Wärmelehre ließ bis in die Zeit der industriellen Revolution auf sich warten.

Längst liefen vielerorts Dampfmaschinen, als man Fragen zu untersuchen begann wie die: Woher rührt die Kraft des Dampfes? Wieviel Bewegung läßt sich durch Verbrennen einer bestimmten Heizmaterialmenge erzeugen, wie kann man diese Menge berechnen oder, um Brennstoff zu sparen, beeinflussen?

Damit zugleich aber rückte für die Naturforscher ein Problem in den Vordergrund:

Was ist eigentlich Wärme?

Wärme sei, so eine damals verbreitete Ansicht, eine extrem feine, unsichtbare Substanz; es gäbe einen Wärmestoff. Er sei in allen Körpern enthalten und könne von einem Körper zum anderen übergehen.

Viele Vorgänge und Beobachtungen waren mit dieser Hypothese erklärbar.

Ein Körper, der sich bei Erwärmung ausdehnte, saugte sich mit Wärmestoff voll wie ein Schwamm mit Wasser; entsprechend dachte man sich das Zusammenziehen bei Abkühlung als Auspressen von Wärmestoff.

Warme Körper gaben solange Wärmestoff an kältere ab, bis ein Ausgleich erreicht war. Wärmeleitung war nichts anderes als ein langsames Strömen von Wärmestoff.

Je nach Masse und Material konnte ein Körper mehr oder weniger Wärmestoff aufnehmen oder abgeben. Das führte auf die Begriffe spezifische Wärmekapazität und Wärmekapazität (genau gefaßt wurden diese allerdings erst im 18. Jahrhundert).

Schwieriger waren schon das Schmelzen und Verdampfen oder die Wärmestrahlung zu erklären. Daß man, wie im 17. Jahrhundert demonstriert wurde, Schießpulver mittels eines aus Eis »gefertigten« Brennglases und Sonnenlicht entzünden konnte, vertrug sich überhaupt nicht mit der Vorstellung vom Wärmestoff. Auch schlugen alle Versuche fehl, diesen zu wägen.

Solche Versuche, unter anderem von *Robert Boyle* (1627 bis 1691) ausgeführt, sahen zum Beispiel so aus:

Man brachte gleiche Massen von Stoffen möglichst unterschiedlicher spezifischer Wärmekapazität, etwa Wasser und ein Metall, auf einer Waage ins Gleichgewicht und setzte diese in eine wärmere Umgebung. Wenn nun, wie man annahm, der Körper mit der größeren spezifischen Wärmekapazität mehr Wärmestoff aufnahm als der andere, hätte sich die Waagschale entsprechend senken müssen. Da nichts dergleichen geschah, sprach man dem Wärmestoff als weitere Eigenschaft die der Unwägbarkeit zu.

Schon seit Anfang des 18. Jahrhunderts gab es aber auch eine andere Vorstellung von der Wärme, mit deren Hilfe sich die meisten Erscheinungen ebenfalls deuten ließen. Sie wurde vertreten von so hervorragenden Gelehrten wie *Daniel Bernoulli* (1700 bis 1782), *Leonhard Euler* (1707 bis 1783), von *Christian Huygens* (1629 bis 1695), *Antoine-Laurent Lavoisier* (1743 bis 1794), auf Grund der mißlungenen Wägeversuche auch von *Boyle* und anderen. Wärme ist eine Bewegungsart – so etwa drückten sie sich aus.

Besonders klar wurde diese Vorstellung von dem großen russischen Gelehrten *Michail Wassiljewitsch Lomonossow* (1711 bis 1768) ausgesprochen.

In seinen »Betrachtungen über die Ursache von Wärme und Kälte« deutet er die Wärme als kreisende Bewegung der Teilchen eines Körpers. Die Temperatur hänge von der Geschwindigkeit der sich bewegenden Teilchen ab; die niedrigste Temperatur, die man sich denken könne, sei erreicht, wenn diese Bewegung aufhöre, während sich eine obere Temperaturgrenze nicht angeben lasse. Welcher Leser aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts denkt hier nicht unwillkürlich an den absoluten Nullpunkt und an Temperaturen von Hunderttausenden oder Millionen Grad, wie sie in der Plasmaphysik genannt werden?

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts neigte sich das Zünglein an der Waage Wärmestoff – Wärme als Bewegung zugunsten der letzteren Vorstellung.

Versuche, eine experimentelle Entscheidung herbeizuführen, sind vor allem mit dem in den USA geborenen *Benjamin Thompson* (Graf Rumford, 1753 bis 1814) verknüpft.

Rumford, der ein recht bewegtes Leben führte und sich in mehreren Berufen versuchte, hatte sich stets für medizinische, naturwissenschaftliche und technische Probleme interessiert. (Er zählt unter anderen zu den Gründern der britischen Royal Institution.) So richtete er, in München als bayrischer Kriegsminister tätig, sein Hauptaugenmerk auf Rüstungswerkstätten und Kanonengießereien, was ihn jedoch nicht davon abhielt, sich auch ökonomischen Fragen zuzuwenden und zum Beispiel die Einrichtung von Manufakturen zu fördern.

Bei seinen Versuchen knüpfte *Rumford* an die Reibungswärme an, die zu untersuchen ihm besonders die Rüstungswerkstätten Gelegenheit boten: Beim Ausbohren von Kanonenrohren erhitzen sich Werkstoff und Werkzeug so, daß intensive Kühlung und längere Zwischenpausen erforderlich waren. Vor allem aber, selbst bei stundenlangem Bohren hörte die Wärmeentwicklung weder auf noch nahm sie meßbar zu.

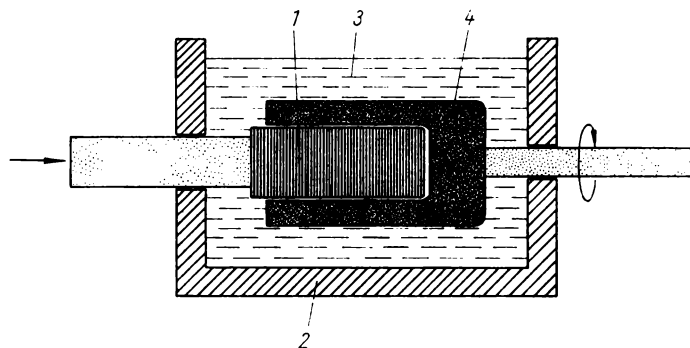
Für *Rumford* war klar, daß sich durch Reibung, durch kraftfordernde Bewegungsvorgänge also, beliebige Wärmemengen gewinnen ließen. Aber man mußte beizeiten allen Einwürfen aus dem Wege gehen – und einer davon lautete etwa: Wäre die spezifische Wärmekapazität der erhitzten abfallenden Bohrspäne viel geringer als die des vollen Materials, würde dessen Vorrat an Wärmestoff gestreckt, es könnte daher sein, daß sich seine Abnahme während des zeitlich begrenzten Bohrens nicht bemerkbar machte.

Rumford begegnete dieser Kritik mit einem Versuch. Er wog gleiche Massen von Spänen und vom vollen Material, erhitze sie in kochendem Wasser bis auf 100°C und warf sie dann in gleiche Mengen gleich kalten Wassers. Die Messung ergab: In beiden Gefäßen erwärmte sich das Wasser um den gleichen Betrag, nahm also auch die gleiche Wärmemenge auf. Daher mußten die spezifischen Wärmekapazitäten beider Ausgangsstoffe gleich sein.

Immerhin mußte die Zeitunabhängigkeit der entwickelten Reibungswärme auch nachgewiesen werden. Hierfür stellte *Rumford* eine spezielle Versuchsanordnung zusammen.

Er ließ einen Metallblock in einem mit Wasser gefüllten Behälter rotieren, wobei ein stumpfer Bohrer als Bremsbelag gegen das Metall gepreßt wurde (also keine Späne entstanden). Ein Pferd besorgte den Antrieb. Nach zweieinhalb Stunden kochte das Wasser; die Wärmeentwicklung ging weiter, bis es verdampft war, und zwar auch dann, wenn immer wieder kaltes Wasser nachgeschüttet wurde. Der Wärmevorrat des geriebenen Körpers erschöpfte sich also nicht, die Wärme entstand offensichtlich, wie *Rumford* vermutet hatte, durch die Bewegung und die für diese aufzuwendende Arbeit, war vielleicht selbst, wie *Rumford* notierte, »Bewegung«, von der man allerdings vorerst nur recht allgemeine Vorstellungen hatte.

Ganz anders geartet waren die Experimente, die *Humphry Davy* zur gleichen Frage anstellte. Er brachte in einem möglichst luftleer gepumpten Gefäß bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt Eisstücke durch gegenseitiges Reiben (mit Hilfe



Rumfords Nachweis, daß durch Reibung beliebige Wärmemengen gewonnen werden können

1 stumpfer Bohrer; 2 wasserdichter Kasten; 3 Wasser; 4 Metallblock

eines Uhrwerks) zum Schmelzen und maß die Temperatur des Schmelzwassers. Obwohl die spezifische Wärmekapazität von Wasser größer ist als die von Eis, war eine deutliche Temperaturerhöhung des Schmelzwassers festzustellen. Auch das war mit der Vorstellung eines Wärmestoffs nicht vereinbar.

Davy war ebenfalls Anhänger der Bewegungshypothese. Seine Vorstellung: Die kleinsten Teilchen der Körper schwingen, je nach der Temperatur, wobei es zu einem Wechselspiel zwischen Anziehung und Abstoßung kommt. Überwiegt diese, ist der Körper gasförmig; überwiegt jene, ist er fest. Der flüssige Zustand nimmt eine Mittelstellung ein.

Bei *Rumfords* Versuchen hatte das Pferd Arbeit verrichtet, die als Wärme wieder zutage trat. Bei allen anderen Reibungsvorgängen gab es eine ähnliche Umwandlung. Wenn aber einerseits mechanische Arbeit stets Wärme erzeugte, andererseits Wärme sich als innere Bewegung der Teilchen eines Körpers erwies – mußte dann nicht zwischen beiden auch ein quantitativer Zusammenhang zu finden sein, eine Zahl, die eindeutig Auskunft gab, welche Menge an mechanischer Arbeit welcher Wärmemenge gleichwertig ist?

Mit einem solchen mechanischen Wärmeäquivalent hatte eigentlich schon *Rumford* gearbeitet, als er die vom Pferd aufgebraachte mechanische Arbeit mit der erzeugten Wärme verglich. Ähnliche Überlegungen stellte in Frankreich *Nicolas Léonard Sadi Carnot* (1796 bis 1832) an, in dessen für die Entwicklung der Wärmekraftmaschinen grundlegenden Arbeiten sich der Hinweis findet, daß »zur Erzeugung einer Arbeitseinheit 2,7 Wärmeeinheiten« nötig seien.

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts, als die Dampfmaschine in der Industrie zur beherrschenden Antriebsmaschine geworden war und sich im Verkehrswesen durchzusetzen begann, als das Streben nach hohem Wirkungsgrad und niedrigem Brennstoffverbrauch zu zahlreichen Verbesserungen anregte, rückte das mechanische Wärmeäquivalent immer stärker in den Vordergrund des Interesses.

Gerade die Forschungsergebnisse der letzten Jahrzehnte hatten auch die Beantwortung einer anderen Frage nahegelegt: Lassen sich alle »Kräfte« (wir würden heute von Energieformen sprechen) nach bestimmten, festen Gesetzmäßigkeiten ineinander umwandeln?

Beispiele für solche Umwandlungen lieferten Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre, aber auch die Chemie in Hülle und Fülle. Stets jedoch hatte man beobachten können, daß ein bestimmtes Quantum Bewegung nur ein bestimmtes Quantum Wärme, eine bestimmte Elektrizitätsmenge nur bestimmte chemische Umwandlungen usw. hervorruft. Auch waren alle Versuche fehlgeschlagen, ein Perpetuum mobile zu konstruieren, eine Maschine, die nicht nur, wie ihr Name es ausdrückt, ewig läuft, sondern dabei noch Arbeit verrichtet. Tausendfacher Erfahrung entsprang die Überzeugung, daß ein Perpetuum mobile prinzipiell unmöglich sei, daß Arbeit nicht aus dem »Nichts« gewonnen werden könne, sondern stets nur Umwandlungen zwischen verschiedenen Arbeits- und Bewegungsformen möglich seien. (Der Ausdruck Energie in seiner heutigen Bedeutung setzte sich erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durch.) *Lomonossow* drückte das 1747 in einem Brief so aus:

»Aber alle Veränderungen, die in der Natur vorkommen, geschehen so, daß, wenn irgendwo etwas hinzukommt, anderswo ebensoviel abgeht. Also, wieviel Stoff

einem Körper hinzugefügt wird, ebensoviel geht von einem anderen weg; genau-soviel Stunden, wie ich dem Schlaf widme, entziehe ich dem Wachsein usw. Dieses Naturgesetz ist ein allgemeines, so daß es sich selbst auf die Regeln der Bewegung erstreckt; der Körper, welcher einen anderen durch Impuls in Bewegung setzt, verliert ebensoviel von seiner Bewegung, wie er davon dem anderen, von ihm bewegten Körper übergibt.«

Sowohl der Gedanke der Umwandlung wie auch der der Erhaltung bzw. der Unerschaffbarkeit und Unzerstörbarkeit der Energie waren also »vorgeprägt«. Doch obwohl viele Wissenschaftler und Techniker ihn als Arbeitshypothese benutzten, war ihm noch niemand systematisch und mit Untersuchungen nachgegangen, hatte niemand seinen Geltungsbereich abgesteckt und ihn exakt formuliert.

Unter den Forschern, die diese Aufgabe um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts in Angriff nahmen, ist der Heilbronner Arzt *Julius Robert Mayer* (1814 bis 1878) durch seine Arbeiten und Gedankengänge, aber auch durch den lang-jährigen Kampf um ihre Anerkennung am bekanntesten geworden.

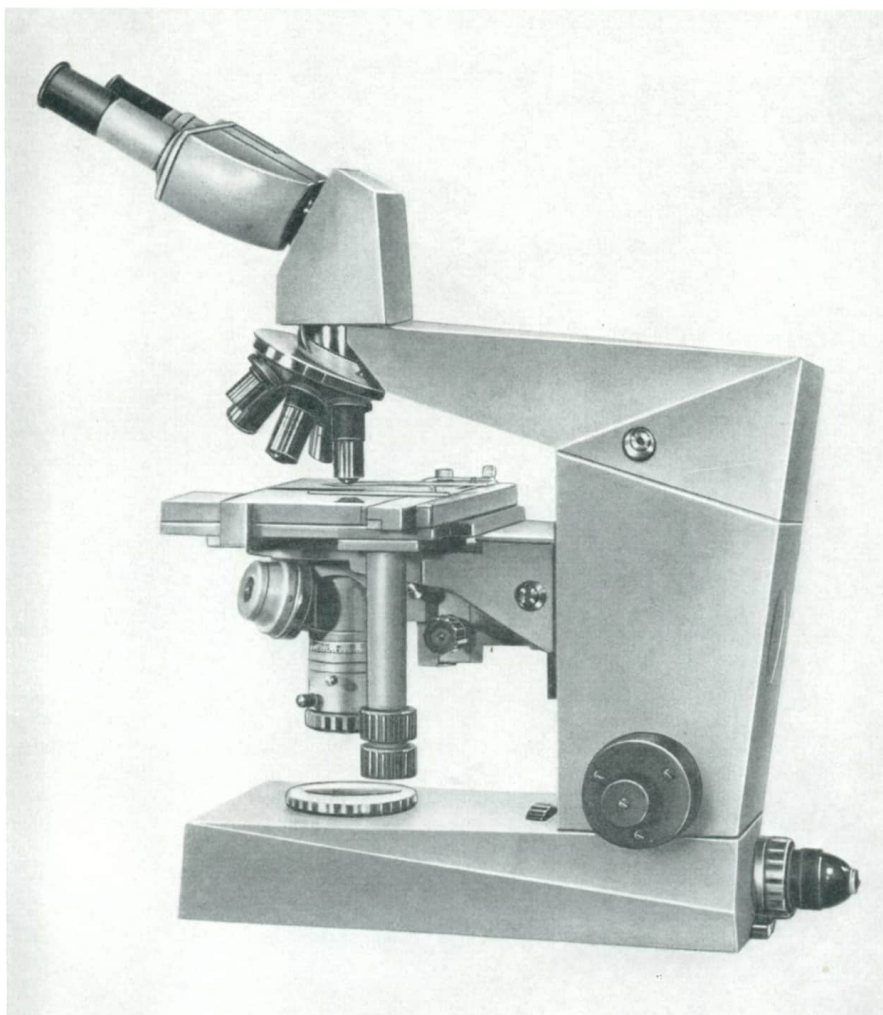
Der Apothekersohn *Mayer* hatte bereits als Junge experimentiert und auch versucht, ein Perpetuum mobile zu erfinden. Die Problematik der Wandelbarkeit und Unzerstörbarkeit der Naturkräfte war ihm also bereits vertraut, als er eine Ost-asienreise als Schiffsarzt antrat.

Die Bemerkung eines Seemanns von dem sich während eines Sturms erwärmenden Meer und eigene Beobachtungen, denen zufolge in tropischen Breiten venöses Blut eine auffallend helle Farbe zeigte (*Mayer* führte sie auf verminderte Oxy-dation der Nahrungsmittel wegen der höheren Außentemperatur zurück), ließen ihn nicht mehr los. Sie waren, wenn nicht Grund, so doch Anlaß für *Mayer*, sich von nun an Fragen der Umwandelbarkeit der »Kräfte zuzuwenden und sie zu »seinem« Thema zu machen.

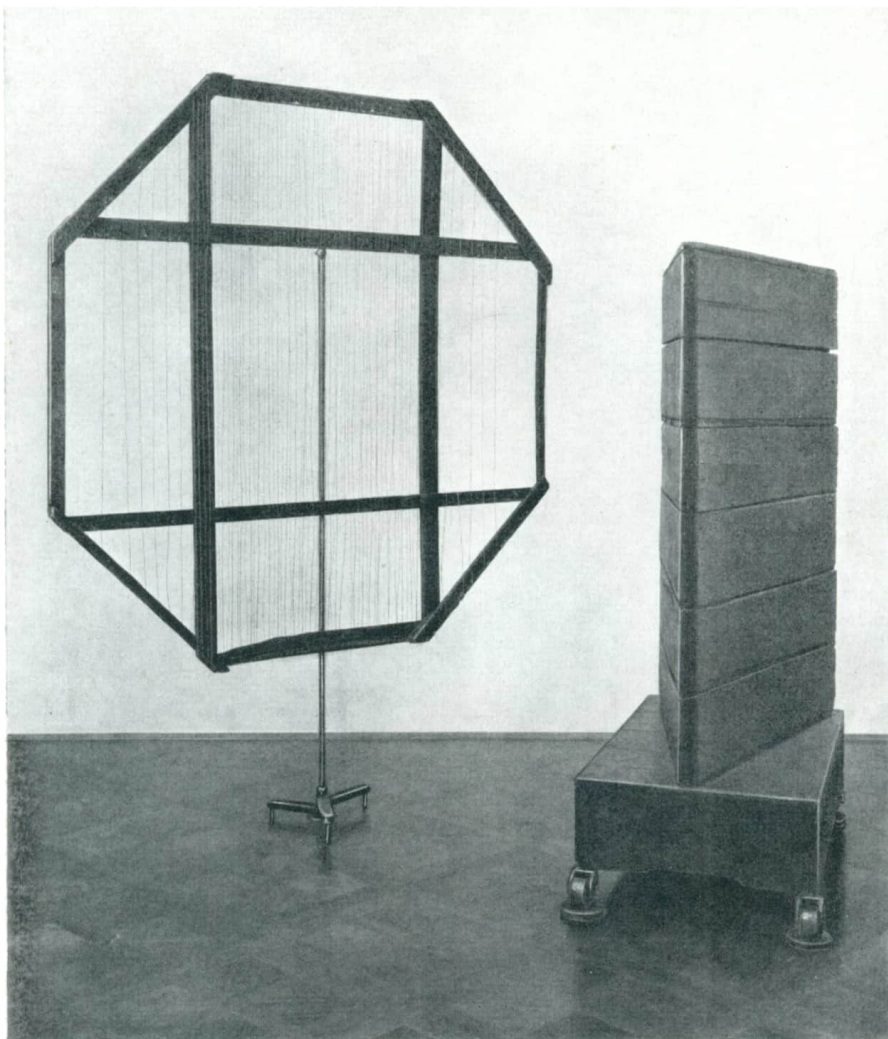
Es war ein umfangreiches Arbeitsprogramm, das er sich damit aufbürdete, zumal ihm als Arzt physikalische Denkweisen und Methoden und vor allem auch das mathematische Rüstzeug nicht vertraut genug waren, um sie mühelos handhaben zu können. Doch bereits am 16. Juni 1841, wenige Monate nach seiner Rückkehr, schickte er einen ersten Aufsatz »Über die quantitative und qualitative Bestimmung der Kräfte« an den Herausgeber der »Annalen der Physik«. *Mayer* erhielt weder eine Bestätigung, daß sein Manuskript eingegangen sei, noch wurde es gedruckt.

Poggendorf, der Herausgeber der »Annalen«, lehnte es grundsätzlich ab, theoretische und zugleich »diskussionsträchtige« Arbeiten zu drucken. Das bekam nicht nur *Mayer*, sondern sogar ein so berühmter Gelehrter wie *Helmholtz* zu spüren.

Trotz dieses Mißerfolges gab *Mayer* nicht auf. Bereits im folgenden Jahr brachte er einen zweiten Aufsatz »Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur« zu Papier. Sechs Seiten nur umfaßte diese Arbeit, doch diesmal hatte ihr Autor seine Gedanken klar ausgedrückt, Schlußfolgerungen gezogen und auf Auswirkungen hingewiesen. Diesen Aufsatz ließ *Justus von Liebig* in seinen »Annalen der Medizin und Pharmacie« abdrucken. Wieder blieb die erhoffte Resonanz aus. Dabei konnte *Mayer* nun schon einen Zahlenwert für das mechanische Wärme-äquivalent angeben. Er erhielt ihn durch ein Gedankenexperiment: Soll Gas um eine bestimmte Temperatur, etwa um 1 oder 5 Grad, erwärmt werden, hängt die



Für alle modernen Verfahren aus-
baufähiges Forschungsmikroskop.
Foto: VEB Carl Zeiss Jena

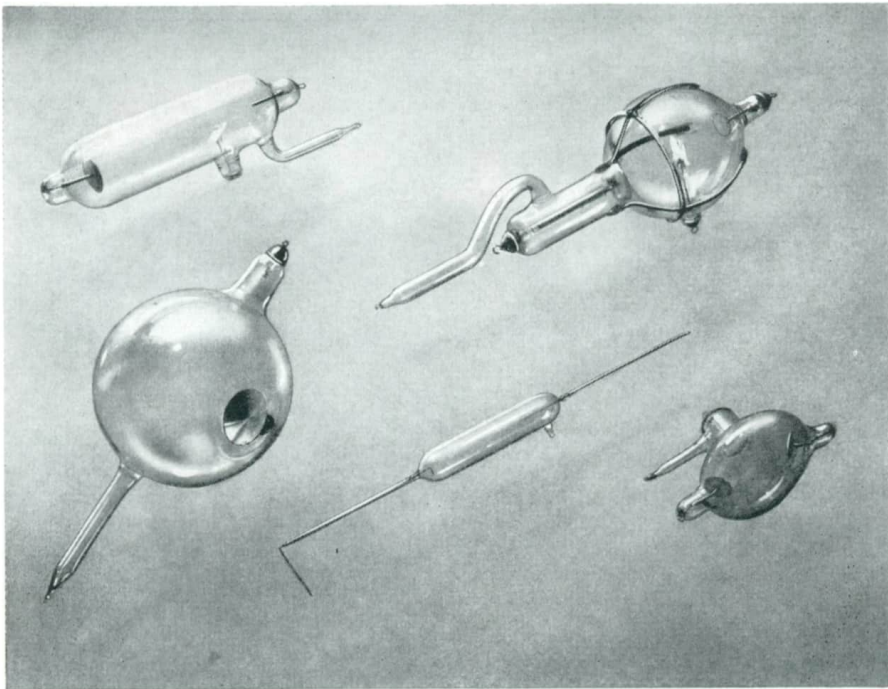


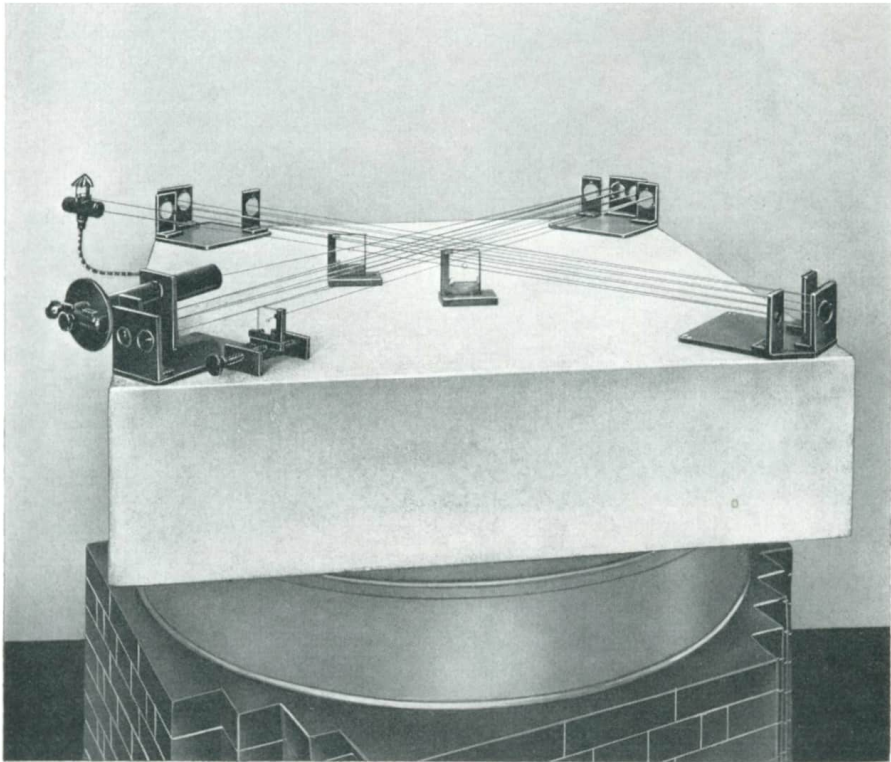
Originalapparate, mit denen H. Hertz
die elektromagnetischen Wellen er-
forschte (1886/88). Foto: Deutsches
Museum München

links: Polarisationsgitter für elektro-
magnetische Wellen

rechts: Pechprisma zum Nachweis der
Brechung elektromagnetischer Wellen

Röhren, mit denen die »X-Strahlen«
von W. C. Röntgen entdeckt und
untersucht wurden (1895). Foto:
Deutsches Museum München





Michelson-Versuchsanordnung zur
Feststellung des »Ätherwindes«
(1881). Foto: Deutsches Museum
München

dazu erforderliche Wärmemenge davon ab, ob sich das Gas dabei ausdehnen kann oder nicht (im ersten Fall bleibt der Druck, im zweiten das Volumen unverändert). Kann es sich ausdehnen, ist die nötige Wärmemenge größer. Auch ein Nichtphysiker versteht das: Das Gas muß sich Platz schaffen, das heißt, Arbeit gegen den äußeren Luftdruck verrichten.

Demzufolge gibt es für ein Gas auch zwei spezifische Wärmekapazitäten. Die eine, c_p , gilt, wenn der Druck, die andere c_v , wenn das Volumen konstant bleibt.

Das alles war *Mayer* bekannt, und darauf gründete er seine Überlegungen:

Das zu erwärmende Gas befindet sich, so nahm *Mayer* an, in einem Zylinder, in dem ein masseloser Kolben reibungsfrei auf- und abgleiten kann. Um wieviel sich der Kolben bei einer Erwärmung des Gases infolge der Ausdehnung heben würde, ließ sich ausrechnen; daraus erhielt man die gegen den Luftdruck zu leistende Arbeit. Sie muß, so sagte sich *Mayer*, gleich dem Unterschied der Wärmemengen bei gleichbleibendem Druck und gleichbleibendem Volumen sein. Dieser Unterschied aber folgte aus der Gasmenge und den bekannten spezifischen Wärmen. Indem *Mayer* diese Differenz mit der vom Kolben zu leistenden Arbeit verglich, ergab sich das gesuchte mechanische Wärmeäquivalent.

Der Wert, den *Mayer* erhielt, war allerdings, wie sich bald zeigte, zu klein; die Schuld an dieser Abweichung trugen jedoch nicht *Mayers* Berechnungen, sondern die damals noch ungenauen Daten für die spezifischen Wärmekapazitäten c_p und c_v .

Mayer versuchte, über diese Zahl mit Kollegen in persönliche Gespräche und Diskussionen zu kommen – vergebens. Für sie war er kein Kollege, sondern Außenseiter, Eindringling, verdächtig zudem durch sein Vorgehen, bei dem er Theorie und Experiment nicht getrennt, sondern im Zusammenhang betrachtete und auch vor philosophischen Schlußfolgerungen nicht zurückschreckte. Hatte man früher verlangt, er solle seine Ansichten durch einen Zahlenwert belegen, so heißt es jetzt, diese Zahl müsse erst durch ein Experiment gewonnen, nicht aber errechnet werden.

Auch diese Forderung zu erfüllen war *Mayer* bereit. 1849 beschrieb er seine Versuchsanordnung in der »Augsburger Allgemeinen Zeitung«. Sie ist nicht kompliziert: Ein beweglicher Kolben preßt Wasser durch eine kleine Öffnung. Die dazu nötige mechanische Arbeit und die Erwärmung des Wassers werden sorgfältig gemessen und zueinander in Beziehung gesetzt. Das Experiment gelang. Es lieferte, hundertfach wiederholt, eindeutige Zahlenwerte.

Inzwischen haben auch andere, ohne zunächst von *Mayer* zu wissen, sich mit der experimentellen Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents befaßt.

Der bekannteste unter ihnen, der Engländer *James Prescott Joule* (1818 bis 1889), war ebenfalls kein Physiker von Beruf, sondern ging einem nahrhaften Gewerbe nach. Er trat in die Brauerei seines Vaters ein und übernahm später deren Leitung. Physikalische Untersuchungen betrieb er aus Liebhaberei.

Er experimentierte auf den Gebieten des Magnetismus und der Elektrizität, untersuchte Strömungsvorgänge und beschäftigte sich mit der kinetischen Gastheorie. Einfallsreich und handfertig zugleich, ersann und baute er immer neue Versuchsanordnungen und vervollkommnete die Meßeinrichtungen, die er für eindeutige und exakte Resultate benötigte.

Das Problem der »Umwandelbarkeit der Kräfte« interessierte auch ihn brennend. Ausgangspunkt, es zu untersuchen, waren ihm vor allem elektrische Erscheinungen. Hier traten die Umwandlungen besonders deutlich zutage.

Elektrischer Strom erzeugte Wärme, übte chemische und magnetische Wirkungen aus. Umgekehrt ließ sich Strom durch chemische Vorgänge, durch Wärme und mit Hilfe des Magnetismus erzeugen. Es gab also genügend Ansatzpunkte. *Joule* übersah sie nicht.

Mit 23 Jahren gab er die Resultate seiner Untersuchungen über die Wärmewirkungen des elektrischen Stroms bekannt. Der Aufsatz enthielt das Gesetz, das heute *Joules* Namen trägt: Die vom elektrischen Strom entwickelte Wärmemenge ist dem Quadrat der Stromstärke, der Flußzeit des Stroms und dem Widerstand des Leiters proportional.

Joule benutzte galvanische Elemente als Spannungsquelle. Zwischen den in ihnen ablaufenden chemischen Vorgängen und der freiwerdenden Wärmemenge im Stromkreis mußte ein Zusammenhang bestehen – mehr noch: Wenn man die »Erhaltung der Kraft« voraussetzte, mußten umgesetzte chemische Energie und entwickelte Wärme gleich sein. Da *Joule* diese leicht messen konnte, erhielt er auch Zahlenwerte für die chemische Energie, der diese Wärme entstammte.

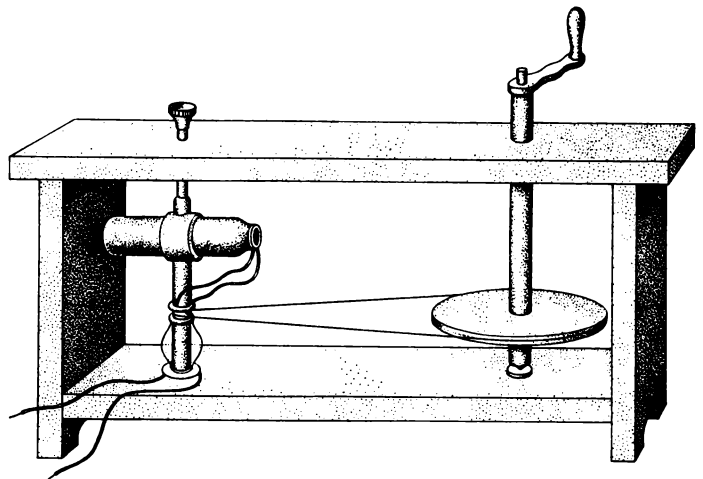
Galt die gefundene Gesetzmäßigkeit aber auch dann, wenn Strom nicht durch eine chemische Spannungsquelle, sondern durch Induktion, also mit Hilfe eines Magnetfeldes, gewonnen wurde? Um das zu untersuchen, stellte *Joule* die im Bild skizzierte Versuchsanordnung zusammen.

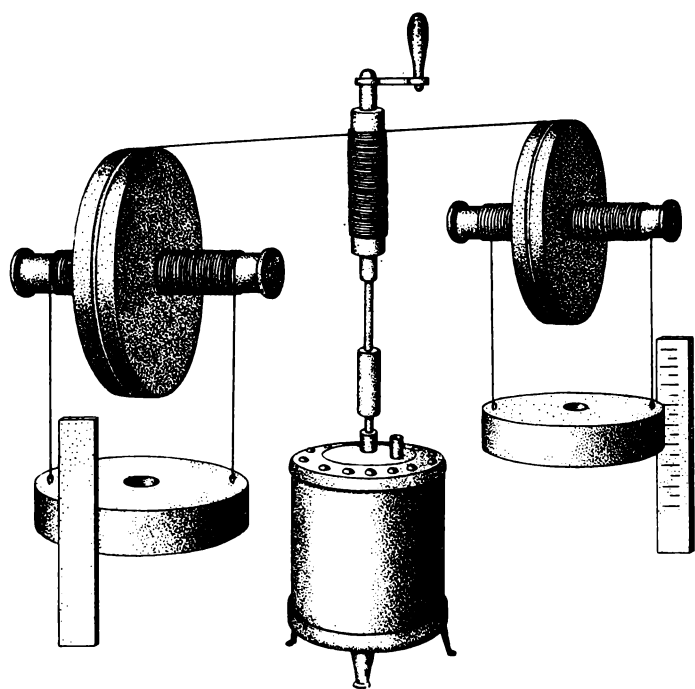
Im Feld eines (nicht mitgezeichneten) Dauermagneten ist eine drehbare, mit Wasser gefüllte Glasröhre angebracht. In ihrem Inneren befindet sich eine mit einem Eisenkern versehene Spule. Die Spulenenden führen zu einem Strommeßinstrument.

Wird die Spule gedreht, fließt ein Induktionsstrom, der die Spule und über diese das Wasser erwärmt. Aus der Temperatursteigerung, der vom Instrument angezeigten Stromstärke sowie aus der Zeitspanne des Versuchs ergab sich, daß das für chemische Spannungsquellen gefundene Zahlenverhältnis auch hier galt.

Die Kurbel zu drehen erforderte mechanische Arbeit. Sie verwandelte sich auf

Joules Versuchsanordnung zur Bestimmung des elektrischen Wärmeäquivalents





Joules Versuchsanordnung zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents

dem Umweg über die Stromerzeugung in Wärme. *Joule* bestimmte auf diese Weise das mechanische Wärmeäquivalent. Dabei trieb er die Induktionsspule durch ein sinkendes Massestück an, wodurch sich die aufgewendete mechanische Arbeit sehr einfach aus dessen Größe und Weg ergab. Das Resultat kam dem tatsächlichen Wert recht nahe.

Auch Messungen der unmittelbaren Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit und umgekehrt unternahm *Joule*. So bestimmte er – ähnlich wie *Mayer* – das mechanische Wärmeäquivalent, indem er Wasser durch eine Düse drückte und die Temperaturerhöhung maß. Schließlich schuf er eine Versuchsanordnung, die für Demonstrationszwecke auch heute noch benutzt wird.

In einem gegen Wärmeverluste sorgfältig isolierten Gefäß rotieren drehbare Flügel zwischen feststehenden. Der Abstand zwischen den Flügelgruppen ist gering; das Gefäß wird mit Wasser oder Quecksilber gefüllt. Sinkende Massestücke versetzen das Flügelrad in Drehung. Die Flüssigkeitsreibung zwischen festen und beweglichen Flügeln behindert sie. Die Temperatur der Flüssigkeit steigt. Die von ihr und den mit ihr in Verbindung stehenden Teilen der Apparatur aufgenommene Wärmemenge läßt sich aus der Temperaturerhöhung der Flüssigkeit bestimmen, während die zur Wärmeerzeugung nötige mechanische Arbeit aus der von den Massestücken zurückgelegten Wegstrecke errechnet werden kann.

Der Ingenieur *Gustav Adolf Hirn* (1815 bis 1890) untersuchte als technischer Leiter der väterlichen Textilfabrik Brennstoffverbrauch und Wirkungsgrad von Dampfmaschinen, die Verluste an Arbeitsmaschinen, Reibungsvorgänge und ihre Beeinflussung durch Schmiermittel.

Das führte ihn auf die Beziehung zwischen mechanischer Arbeit und Wärme. 1858 veröffentlichte er eine Arbeit über seine Untersuchungen, zwei Jahre danach führte er zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents die nach ihm benannten Stoßversuche aus:

Gegen eine unelastische Masse, zum Beispiel gegen einen Bleiklotz, stieß ein anderer Körper bekannter Masse und Geschwindigkeit. Seine leicht errechenbare Wucht wurde zum Teil in Wärme umgewandelt, deren Menge sich aus der Temperaturerhöhung des Bleiklotzes ergab.

Daß sich das Wärmeäquivalent auch unmittelbar über Reibungsvorgänge messen läßt, zeigte der Däne *August Ludwig Colding* (1818 bis 1889).

Langsam, mit ständig verbesserten Meßwerten, wird das mechanische Wärmeäquivalent zur rechnerisch und experimentell gesicherten Gewißheit.

Julius Robert Mayer erfährt von alledem zunächst nichts. Aber auch diejenigen, die sich um das Wärmeäquivalent mit Experimenten bemühen, wissen anfänglich nichts von *Mayer*. Als *Helmholtz* 1847 seinen berühmten Vortrag »Über die Erhaltung der Kraft« hält, erwähnt er *Mayer* nicht einmal.

Jahre, die *Mayer* an den Rand der Verzweiflung bringen, vergehen, ehe auch seine Gedanken und Arbeiten anerkannt werden. Endlich setzen sich weltbekannte Gelehrte, unter ihnen *Justus von Liebig*, für den »verrückten« Arzt ein.

Wo man früher gespottet hatte, lobte man; wo man einst wider besseres Wissen geschwiegen hatte, sparte man nicht an Ehrungen und Anerkennungen.

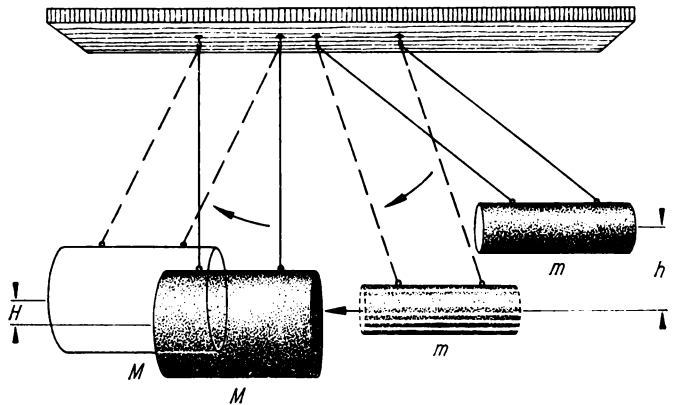
Wollte man ein schlechtes Gewissen beruhigen?

Mayer aber arbeitete weiter, faßte seine Resultate zusammen, erweiterte sie.

Als er nach einem Leben der Arbeit, der Enttäuschungen und des späten Triumphs die Augen für immer schloß, gehörte das Gesetz von der Umwandlung und Erhaltung der Energie zum unentbehrlichen Wissensbestand der Physik und der Technik.

Bis in die jüngste Zeit allerdings wurden mechanische Arbeit und Wärmemenge in unterschiedlichen Einheiten gemessen, von denen die Kalorie wohl am berühmtesten wurde. Das mechanische Wärmeäquivalent legte den »Wechselkurs« fest. Das Internationale Einheitensystem (SI) beseitigte diesen Mangel: »Joule« ist gleichermaßen Einheit für Wärmemenge, Arbeit und Energie.

Der Hirnsche Stoßversuch: Die auf den Bleiklotz der Masse M prallende Masse m hebt diesen um ein geringes Stück H an. Die Energiedifferenz $mgb - Mgh$ zwischen der fallenden und der gehobenen Masse ist leicht meßbar. Sie entspricht der entwickelten Wärmemenge. Wird diese ebenfalls gemessen, ist das mechanische Wärmeäquivalent errechenbar



D

Die zwei Gestalten des Unentbehrlichen

Dem Licht gilt die erste Augenbewegung des jungen Erdenbürgers; das Los eines Menschen, dessen Auge niemals oder niemals mehr einen Lichtschimmer wahrnimmt, ist kaum zu ermessen. Selbst niederste Lebewesen reagieren auf Licht.

So unentbehrlich ist Licht, daß die Menschen seit Jahrtausenden bemüht sind, künstliche Lichtquellen zu schaffen, sie zu verbessern, um auf diese Weise den Tag zu verlängern.

Dem Licht verdanken wir, daß uns die Welt bunt erscheint. Ohne seine Hilfe könnte keine Pflanze gedeihen.

Lichtstrahlen, mitunter Milliarden Jahre unterwegs, tragen Botschaften, die uns die Geheimnisse der Natur enträtseln helfen.

Wundert uns, daß schon die Alten über das Licht nachdachten, daß das Licht (oder die Sonne) in allen religiösen Vorstellungen einen hervorragenden Platz einnahm, daß die Optik, die Lehre vom Licht, von seinen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten, entwickelt wurde, seitdem Wissenschaft betrieben wird?

Viele Gesetze, die das Licht befolgt, sind sehr einfach. Man kannte und nutzte sie schon vor Hunderten von Jahren. Sie bilden die Grundlage zahlloser Geräte und Apparaturen – von der Brille bis zum Riesenteleskop, von der gleißenden Helle des Scheinwerfers bis zum Blick durch das Mikroskop.

Was aber ist Licht? Seinen Steckbrief zu formulieren war schwierig. Denn es zeigte sich janusköpfig, schien manchmal den Wellen des Wassers ähnlich, manchmal einem Hagel winziger Teilchen. Über 100 Jahre dauerte es, bis eine Entscheidung getroffen werden konnte – weit weniger Zeit verstrich, bis auch sie wieder korrigiert werden mußte.

»Optics or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light« heißt der vollständige Titel einer umfangreichen Arbeit *Newtons*, die 1704 in London erschien.

Nur Wissenschaftshistoriker lesen heute noch den Text. Teile davon sind jedoch uns allen vertraut; denn viele der von *Newton* beschriebenen Versuche gehören zum unentbehrlichen Bestandteil jedes Physikunterrichts: die Zerlegung des Sonnenlichts in Spektralfarben und ihre Wiedervereinigung zu weißem Licht mit Hilfe von Prismen, die Untersuchung der Brechung von Licht verschiedener Farbe, der Körperfarben und der »Farben dünner Blättchen«, die uns auf jeder bunt-schillernden Öllache begegnen.

Zwar wollte *Newton*, wie er am Beginn seiner »Optik« betont, die Eigenschaften des Lichts nur untersuchen und durch Experimente aufdecken, ohne Hypothesen einzuführen; doch konnte nicht ausbleiben, daß er sich auch Gedanken über das Wesen, über die Natur der Lichtstrahlen machte und daß diese Überlegungen in sein Werk einfließen. Als »Emissionstheorie« oder »Emanationstheorie« haben die von *Newton* und seinen Anhängern mit Zähigkeit vertretenen Ansichten bis in das 19. Jahrhundert eine große, der Entwicklung der Physik nicht immer förderliche Rolle gespielt.

Licht ist nach *Newton* ein Strom sehr kleiner Teilchen. Sie werden von jeder Lichtquelle emittiert, ausgestoßen, und fliegen im leeren Raum oder in einem homogenen Stoff geradlinig mit sehr hoher Geschwindigkeit. Die Teilchen unterscheiden sich in ihrer Größe, und diese ist ausschlaggebend für die Farbe des Lichts.

Daß *Newton* sich auf die »Teilchenhypothese« festlegte, ist ebenso verständlich wie die Tatsache, daß diese Ansicht im Laufe der Jahrhunderte schon mehrfach vertreten worden war, wobei unter anderem auch die Vermutung auftauchte, nicht von der Lichtquelle, sondern vom Auge gingen kleinste Teilchen aus, mit denen die Umwelt gewissermaßen abgetastet wurde.

Jeder Schatten sprach für die geradlinige Ausbreitung des Lichts, und diese wieder für die Annahme geradlinig fliegender Teilchen. Licht durchdrang den leeren Raum, aber es brauchte Zeit dazu. Also konnte es sich nicht um eine sich »zeitlos« fortpflanzende Kraft handeln – offenbar »flog etwas« durch den Raum, und was sollte das anders sein als kleinste Teilchen?

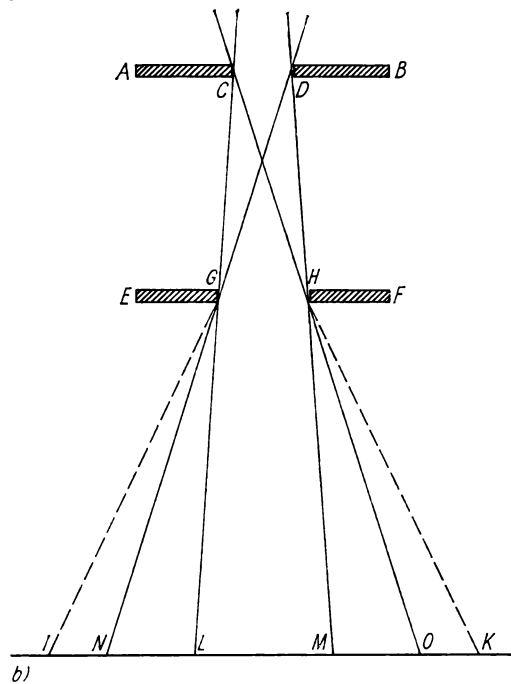
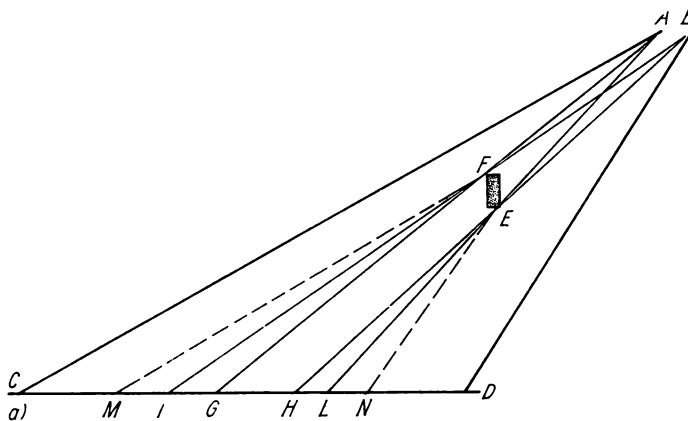
Allerdings zog *Newton* solche Folgerungen nicht vorschnell. Für ihn, der in physikalischen Vorgängen vor allem ein Zusammenwirken von Massen, Kräften und Bewegungen sah, mußte ein Kriterium für die Richtigkeit der Emissionstheorie sein, ob sich optische Erscheinungen und Grundgesetze erklären ließen, wenn man auf die vermuteten Lichtteilchen die Gesetze der Mechanik anwandte. Zunächst bereitete das keine Schwierigkeit. Die geradlinige Ausbreitung zum Beispiel entsprach dem Verhalten eines Körpers, auf den – nachdem er einmal in Bewegung gesetzt worden war – keine nennenswerten Kräfte mehr einwirkten. Der Einwurf, daß im Schwerfeld der Erde auch Lichtteilchen eine gekrümmte Bahn durchlaufen müßten, ließ sich mit der hohen Teilchengeschwindigkeit entkräften: Ein geworfener Stein durchfliegt eine um so gestrecktere Bahn, je höher seine Anfangsgeschwindigkeit ist.

Trifft Licht eine spiegelnde Fläche, gilt das Gesetz »Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel«. Es ist den Vorgängen beim elastischen Stoß vergleichbar, zum Beispiel dem Zurückprallen eines schräg gegen eine Mauer geworfenen Balls.

Lichtbrechung und Entstehen des Spektrums konnte *Newton* gleichfalls erklären: Dringt Licht in einen durchsichtigen Körper, werden seine Teilchen, je nach ihrer Größe, von den Partikeln des Körpers mehr oder weniger angezogen und dadurch aus ihrer Bahn geworfen. Die kleinsten, zum Violett gehörenden Teilchen werden am meisten, die größeren roten am wenigsten abgelenkt. Die Ablenkung der anderen Farben liegt, je nach Lichtteilchengröße, dazwischen. Als eine damals nicht nachprüfbare Folgerung ergab sich die (wie sich später herausstellte, falsche) Annahme, daß Licht einen optisch dichteren, das heißt weniger durchlässigen Stoff mit höherer Geschwindigkeit durchdringt als einen optisch dünneren.

Andere Erscheinungen vertrugen sich schlecht mit der Emissionstheorie. Vor allem die Beugung – die Tatsache, daß Licht unter bestimmten Bedingungen doch um die Ecke gehen kann – und die Interferenz – die Erscheinung, daß unter gewissen Voraussetzungen Lichtstrahlen sich verstärken, schwächen oder sogar auslöschen können – konnte *Newton* nur durch gekünstelte zusätzliche Annahmen erklären. Immerhin nahmen die meisten Schüler des großen *Newton* lieber solche Annahmen in Kauf, als sich der zweiten, zu *Newton* in Widerspruch stehenden Hypothese anzuschließen.

Nach ihr ist Licht kein Teilchenstrom, sondern eine Wellenbewegung, wie sie in ähnlicher Form vom Schall bekannt und untersucht worden war.



Grimaldi erklärt die Beugung des Lichts

- a) der Schatten $M-N$ eines kleinen Körpers $F-E$ ist breiter, als nach geometrischer Konstruktion zu erwarten wäre
- b) der durch die Öffnungen $C-D$ und $G-H$ hervorgerufene Lichtkegel hat einen größeren Durchmesser $I-K$, als nach geometrischer Konstruktion zu erwarten wäre

$A-B$ und $E-F$ Blenden

Auf Anfänge der Wellenhypothese können wir schon in jenen Jahrzehnten des 17. Jahrhunderts treffen, da in Bologna der berühmte Optiker *Francesco Maria Grimaldi* (1618 bis 1663) wirkte. Sein Hauptwerk erschien erst nach seinem Tode und geht auch auf die Erscheinungen ein, deren Erklärung *Newton* so viele Schwierigkeiten bereitete.

So entdeckte *Grimaldi* bei einem ganz einfachen Versuch die Beugung des Lichts: Durch eine Öffnung sehr geringen Durchmessers fiel Sonnenlicht in einen dunklen Raum; in das Strahlenbündel hielt *Grimaldi* einen kleinen, undurchsichtigen Gegenstand. Der Schatten, den dieser auf eine Fläche warf, war überraschenderweise nicht nur größer, als bei geradliniger Ausbreitung nach geometrischen Gesetzen zu erwarten gewesen wäre, sondern von einem farbigen Saum umgeben. Offenbar wurde das Licht an den Rändern des Hindernisses aus seiner Bahn geworfen, »gebeugt«. *Grimaldi* gab hierfür folgende Erklärung:

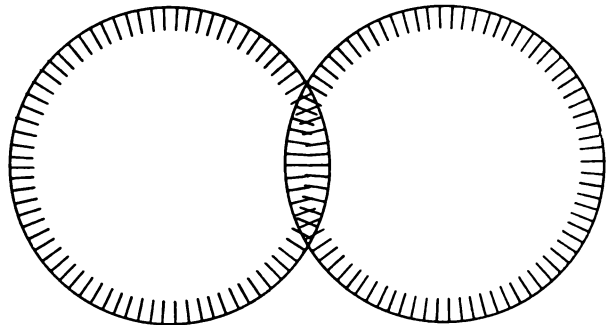
»Wie sich um einen Stein, den man ins Wasser wirft, kreisförmige Wellen bilden, ebenso entstehen um den Schatten des undurchsichtigen Gegenstandes jene glänzenden Streifen. Und so wie jene kreisförmigen Wellen nichts anderes sind als angehäuften Wasser, um das sich eine Furche hinzieht, so sind auch die glänzenden Streifen nichts anderes als das Licht selbst, das durch eine heftige Zerstreuung ungleichmäßig verteilt und durch schattige Intervalle getrennt wird.«

Auch die Entdeckung der Interferenz geht auf *Grimaldi* zurück:

Durch zwei dicht benachbarte kleine Öffnungen ließ er Sonnenlicht so auf einen Schirm fallen, daß die Lichtfleckchen einander überlappten. Merkwürdigerweise erschienen die Begrenzungen der sich überlappenden Flächenstücke dunkler als die übrigen Fleckenteile, obwohl auch sie vom Licht beider Öffnungen getroffen wurden. Diese Erscheinung war erklärbar, wenn man Wasserwellen zum Vergleich heranzog, die sich je nach ihrem Zusammentreffen ebenfalls verstärken oder auch aufheben können; sie war unverständlich, wenn man durch die Schirmöffnungen fliegende Lichtteilchen annahm.

Besonders klar und folgerichtig durchdachte und formulierte der Holländer *Christian Huygens* (1629 bis 1695) die Wellentheorie des Lichts. *Huygens* arbeitete auf den gleichen Gebieten wie *Isaac Newton*. Die Resultate seiner Untersuchungen und Überlegungen zur Optik enthält seine 1690 in Leiden erschienene »Abhandlung über das Licht«. Es ist die erste zusammenfassende Darstellung der Wellentheorie des Lichts.

Grimaldi erklärt die Interferenz des Lichts



Zur Begründung seiner Vorstellungen führt *Huygens* unter anderem aus:

»... Man beachte ferner die außerordentliche Geschwindigkeit, mit der Licht sich nach allen Richtungen hin ausbreitet, und erwäge, daß wenn es von verschiedenen, ja selbst von entgegengesetzten Stellen herkommt, die Strahlen sich einander durchdringen, ohne sich zu hindern. Man begreift dann, daß, wenn wir einen leuchtenden Gegenstand sehen, dies nicht durch die Übertragung einer Materie geschehen kann, ... wie etwa ein Geschoß oder ein Pfeil die Luft durchfliegt ...

Wir wissen, daß vermittelst der Luft ... der Schall sich im ganzen Umkreis des Ortes, wo er erzeugt wurde, durch eine Bewegung ausbreitet, die allmählich von einem Luftteilchen zum anderen fortschreitet. Da die Ausbreitung dieser Bewegung nach allen Seiten gleich schnell erfolgt, müssen sich gleichsam Kugelflächen bilden, die sich immer mehr erweitern und schließlich unser Ohr treffen. Es ist nun zweifellos, daß auch das Licht von den leuchtenden Körpern bis zu uns durch irgendeine Bewegung gelangt, welche der dazwischen befindlichen Materie mitgeteilt wird; denn wir haben ja bereits gesehen, daß dies durch die Fortführung eines Körpers, der etwa von dort hierher gelangt, nicht möglich ist. Wenn nun ... das Licht zu seinem Wege Zeit gebraucht, so folgt daraus, daß diese der Materie mitgeteilte Bewegung eine allmähliche ist. Sie muß sich deshalb ebenso wie diejenige des Schalls in kugelförmigen Flächen oder Wellen ausbreiten, welche man im Wasser beim Hineinwerfen eines Steins sich bilden sieht ...«

Huygens wies aber bereits auch auf Unterschiede hin:

»Wenn sich hierin nun auch beide gleichen, so unterscheiden sie sich doch in mehreren Beziehungen. Der Schall wird bekanntlich durch die plötzliche Erschütterung eines ganzen Körpers oder eines beträchtlichen Teils eines solchen hervorgebracht, welche die gesamte umgebende Luft in Bewegung setzt. Die Lichtbewegung hingegen muß von jedem Punkte des leuchtenden Gegenstandes ausgehen, damit man alle verschiedenen Teile dieses Gegenstandes wahrnehmen kann ... Nach meiner Meinung läßt sich diese Bewegung durch nichts besser als dadurch erklären, daß man annimmt, die leuchtenden Körper seien aus Teilchen zusammengesetzt, die mit einer großen Geschwindigkeit bewegt und gegen die umgebenden, viel kleineren Ätherteilchen gestoßen werden ...

Die jetzt folgende Untersuchung über das Wesen der von mir Äther genannten Materie, in welcher die von den leuchtenden Körpern kommende Bewegung sich ausbreitet, wird zeigen, daß diese Substanz nicht dieselbe ist wie diejenige, die zur Ausbreitung des Schalls dient.«

Daß *Huygens* auf den »Äther« (wir werden an anderer Stelle ausführlich mit ihm zu tun bekommen, s. S. 153) nicht verzichtete, war verständlich: Wo Wellen auftraten, mußte es nach damaliger Auffassung ein Medium geben, in dem sie sich bilden konnten, eine Substanz, in der »Wellen geschlagen« wurden.

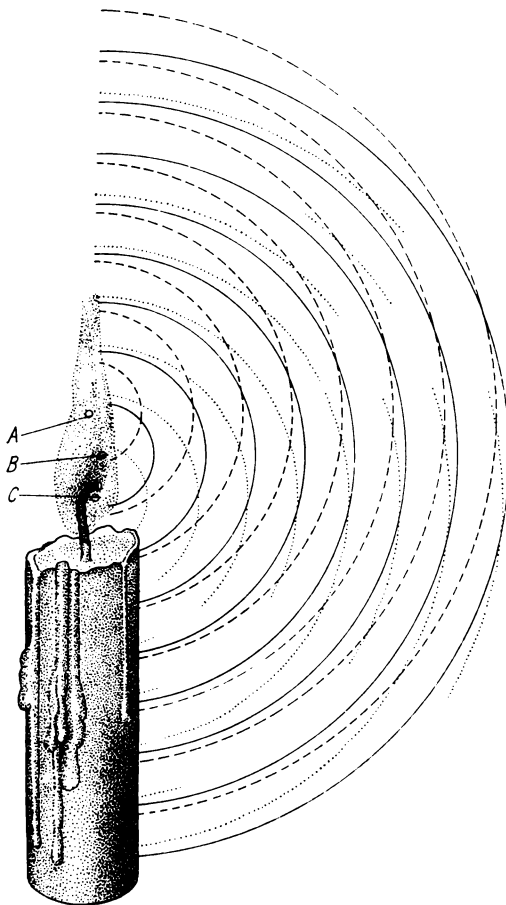
Über die Ausbreitung der Wellen lesen wir bei *Huygens*:

»Hinsichtlich der Fortpflanzung dieser Wellen ist ferner noch zu bedenken, daß jedes Teilchen des Stoffes, in dem eine Welle sich ausbreitet, nicht nur dem nächsten Teilchen, das in der von dem leuchtenden Punkt aus gezogenen geraden Linie liegt, seine Bewegung mitteilen muß, sondern notwendig allen übrigen, die es berühren und sich seiner Bewegung widersetzen. Daher muß sich um jedes Teilchen eine Welle bilden, deren Mittelpunkt dieses Teilchen ist.«

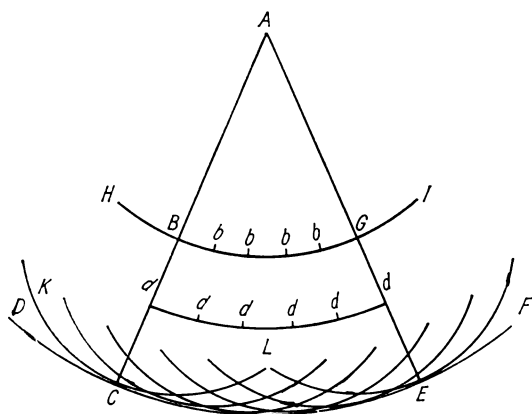
Jedes Ätherteilchen, das von der Lichterregung erfaßt wird, ist daher Ausgangspunkt einer kugelförmigen Elementarwelle; alle Elementarwellen setzen sich zu den beobachtbaren Wellenzügen und Wellenfronten zusammen: Das ist, vereinfacht ausgedrückt, das »Huygenssche Prinzip«, das nicht nur in der Optik, sondern in der Wellenlehre überhaupt eine wichtige Rolle spielt.

Huygens konnte geradlinige Ausbreitung, Reflexion und Brechung mit Hilfe der Wellentheorie erklären. Vor allem aber wurden die Beugungserscheinungen, die *Newton* so viele Schwierigkeiten bereitet hatten, nahezu selbstverständlich, wenn man Elementarwellen annahm.

Huygens' Ableitung des Brechungsgesetzes gab überdies Hinweise, wie man sich durch Experimente für die Teilchen- oder Wellenhypothese würde entscheiden können. Im Gegensatz zur Emissionstheorie mußte nach der Wellenhypothese das Licht im optisch dichteren Stoff eine geringere Geschwindigkeit haben als im optisch dünneren. Die Entscheidung für die Wellen- oder Teilchenhypothese hing also von einer Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit im durchsichtigen Stoff ab (s. S. 46).



Drei Punkte einer Kerzenflamme als Ausgangspunkte A, B, C von Elementarwellen (nach einer Skizze von Huygens)



Die resultierende Wellenfront $D-C-E-F$ entsteht durch Zusammensetzen von Elementarwellen, z. B. der von B ausgehenden Elementarwelle $K-C-L$ mit den von den Punkten b und d ausgehenden (nach einer Skizze von Huygens)

Auch *Huygens'* Hypothese hatte noch Mängel und Lücken. Auf die unterschiedlichen Farben zum Beispiel ging *Huygens* überhaupt nicht ein, seine Überlegungen hatten eine Schwarz-Weiß-Optik zum Gegenstand, während sich *Newton* immer wieder mit Farben beschäftigte. Auch daraus, und nicht allein aus der »Autorität« *Newtons*, erklärt sich, daß die im übrigen sehr anschauliche Teilchenvorstellung für nahezu weitere 100 Jahre fast allgemein anerkannt wurde.

Fast – denn zunehmend schlossen sich auch andere Forscher *Huygens'* Ansichten an. Zu ihnen zählen zum Beispiel *Michail Wassiljewitsch Lomonossow* (1711 bis 1765) und *Leonhard Euler* (1707 bis 1783). In seinen »Briefen an eine deutsche Prinzessin über verschiedene Gegenstände der Physik und Philosophie«, 1768 im damaligen Petersburg erschienen, in denen er eine Nichte Friedrich II. unterrichtet, heißt es:

»Diese Ansicht ... wird die Emanationstheorie genannt, weil man glaubt, daß das Licht wirklich von der Sonne und den übrigen leuchtenden Körpern ausfließe, etwa wie das Wasser aus einem Springbrunnen hervorsprudelt. Diese Annahme erscheint von vornherein sehr gewagt und vernunftwidrig; wenn nämlich die Sonne unausgesetzt und nach allen Richtungen solche Ströme von Lichtstoff auswürfe, so müßte offenbar der Sonnenkörper dadurch bald erschöpft sein, oder man müßte wenigstens im Laufe der Jahrhunderte eine Abnahme bemerken ...

Aber es bleibt auch eine andere Schwierigkeit, die nicht geringer zu sein scheint: Nicht nur die Sonne sendet Strahlen aus, sondern auch sämtliche Sterne. Es wären also überall Strahlen der Sonne und der Sterne anzutreffen, die aufeinander prallen müßten. Mit welcher Heftigkeit würde dieser Zusammenprall erfolgen, und wie sehr würde dadurch die Richtung verändert werden? Ein ähnliches Durchkreuzen findet auch bezüglich aller übrigen leuchtenden Körper statt, die man gleichzeitig sieht. Nun erscheint aber jeder deutlich ohne die geringste Störung seitens der übrigen; und das ist der beste Beweis, daß mehrere Lichtstrahlen durch denselben Punkt gehen können, ohne sich gegenseitig zu hindern, was mit der Emanationstheorie unvereinbar zu sein scheint.

Betrachtet man ferner die durchsichtigen Körper, welche das Licht unbehindert und nach allen Seiten hindurchlassen, so müssen die Anhänger jener Meinung

noch dazu annehmen, daß diese Körper geradlinige Zwischenräume besitzen, die von jedem Punkte der Oberfläche nach allen Richtungen ausgehen...

All diese Ungereimtheiten werden, denke ich, genugsam überzeugen, daß die Emanationstheorie unmöglich den Vorgängen in der Natur entsprechen kann...«

In einem weiteren Brief vergleicht auch *Euler* Schall und Licht:

»Wenn nun die Schwingungen der Luft den Schall zur Folge haben, was werden dann wohl die Erzitterungen des Äthers bewirken? Ich glaube, man wird es leicht erraten; es ist das Licht oder die Lichtstrahlen. Es ergibt sich also, daß das Licht rücksichtlich des Äthers dasselbe ist, was der Schall in Beziehung zur Luft bedeutet, und daß die Lichtstrahlen nichts anderes sind als durch den Äther fortgepflanzte Erschütterungen, ganz wie der Schall auf den Schwingungen beruht, in welche die Luft versetzt wird. In Wirklichkeit kommt also nichts von der Sonne zu uns, ebensowenig wie von einer Glocke, wenn ihr Geläut unser Ohr trifft...«
Trotz dieser und anderer gewichtiger Stimmen verging fast ein weiteres halbes Jahrhundert, ehe mit Hilfe von unwiderlegbaren Experimenten die »Entscheidungsschlacht« zwischen Teilchen- und Wellenhypothese geschlagen und von dieser gewonnen wurde.

Es fällt schwer, denjenigen in ein Fachgebiet einzuordnen, der hieran als einer der ersten maßgeblich beteiligt war; denn *Thomas Young* (1773 bis 1829) galt als äußerst vielseitiger Gelehrter. Er war – zitiert nach einem bekannten Wissenschaftshistoriker – »Arzt, Philosoph, Mathematiker, Physiker, Archäologe...«, der in den vornehmen Kreisen Londons einen Ruf als Reiter, Musiker und Maler genoß. Derselbe *Young*, der auf den Gebieten der Physik und der Physiologie so Hervorragendes leistete, gehörte zu den ersten Archäologen, denen die Enträtselung der Hieroglyphen gelang.

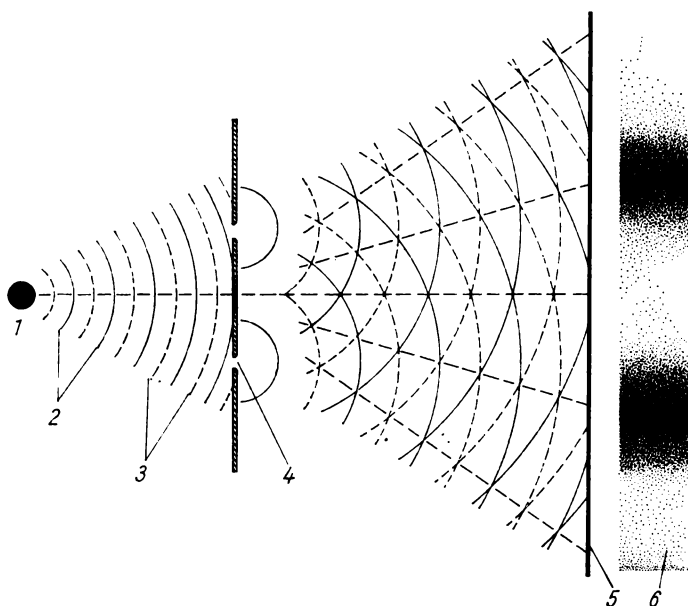
Young untersuchte *Newtons* Arbeiten sehr kritisch und stieß auf zahlreiche Widersprüche. Er entschied sich daher für die Wellenhypothese und versuchte, optische Erscheinungen unter diesem Gesichtspunkt zu deuten.

An dünnen Blättchen studierte er die Interferenz, ein Ausdruck übrigens, der von ihm geprägt wurde. Er erklärte die von *Newton* beschriebenen Erscheinungen so: Die farbigen bzw. bei einfarbigem Licht dunklen und hellen Streifen oder Ringe kommen dadurch zustande, daß von der ersten und zweiten Grenzfläche des dünnen Blättchens teilweise reflektierte Lichtwellen einander überlagern und verstärken, schwächen und an bestimmten Stellen auslöschen.

»Wenn zwei Wellen verschiedenen Ursprungs«, so schreibt *Young* 1802 in den »Philosophical Transactions«, »sich in gleicher oder in nahezu gleicher Richtung fortpflanzen, so besteht ihre Gesamtwirkung in der Vereinigung der einer jeden entsprechenden Bewegung.«

Als Träger der Lichtschwingungen nahm auch *Young* einen feinen und sehr elastischen Äther an. Die Farben hängen für ihn von der Schnelligkeit der Schwingungen, von – wie man heute sagt – ihrer Frequenz ab, und er entwickelte eine Hypothese für das Farbensehen, die den späteren Arbeiten von *Helmholtz* sehr nahe kommt.

Wenn die Lichtgeschwindigkeit konstant ist und dem Licht verschiedener Farben bestimmte Schwingungszahlen zuzuordnen sind, kann man dem Licht, je nach seiner Farbe, eine bestimmte Wellenlänge zusprechen. Mehr noch: Da die Inter-



Interferenzversuch von Young
 1 Lichtquelle; 2 Wellenberge; 3 Wellentäler; 4 Spalte; 5 Beobachtungsschirm; 6 dunkle und helle Streifen

ferenzererscheinungen durch das Zusammentreffen von Wellenbergen und Wellentälern zustande kommen, muß es möglich sein, Lichtwellenlängen aus dem Abstand der Interferenzstreifen oder -ringe zu bestimmen.

1802 stellte *Young* die entscheidenden Experimente an. Er ließ Licht einer nahezu punktförmigen Lichtquelle durch zwei dicht benachbarte Spalten fallen und fing die Spaltbilder auf. Auf dem Schirm entstand ein System von Interferenzstreifen, deren Abstände ausgemessen werden konnten. Daraus und aus den anderen Versuchsdaten konnte *Young* Lichtwellenlängen errechnen. Er bestimmte sie für Licht verschiedener Farben, und zwar mit einer für die damals in ihren Mitteln noch sehr begrenzte Meßtechnik staunenswerten Genauigkeit.

Young hatte damit einen sehr wichtigen Beitrag für die Wellentheorie geleistet; zugleich war es ein Beleg gegen *Newtons* Lichtteilchen. *Youngs* Arbeiten wurden daher zunächst mit größter Skepsis betrachtet oder überhaupt nicht »zur Kenntnis genommen«.

Allerdings gab es auch in *Youngs* Gedanken- und Beweiskette schwache Glieder. Vertraut mit Schallwellen, sah er auch Lichtwellen zunächst als Längsschwingungen des Äthers an. Damit fehlte ihm die Möglichkeit, manche optischen Erscheinungen zu erklären.

Das galt vor allem für die Doppelbrechung und die Polarisierung des Lichts. Sie waren schon zu *Newtons* Zeiten bekannt:

Schickt man einen Lichtstrahl durch einen Kalkspatkristall, wird er in zwei Teilstrahlen gespalten. Bringt man in den Weg des vom ersten Kristall durchgelassenen Lichts einen zweiten Kristall, erfolgt je nach der Stellung beider Kristalle zueinander eine nochmalige Teilung oder nicht. Auch *Newton* hatte hierfür nur sehr unbefriedigende und wenig glaubwürdige Erklärungen gefunden.

Um 1800 begann der französische Pionieroffizier und Physiker *Étienne-Louis Malus* (1775 bis 1812) die Doppelbrechung erneut zu untersuchen. Dabei entdeckte er, daß ähnliche Erscheinungen auch dann auftreten, wenn man durch einen doppeltbrechenden Kristall Licht betrachtet, das unter bestimmtem Winkel von einer Fläche zurückgeworfen wird. (*Malus* war zu seiner Entdeckung durch die Beobachtung von Sonnenlicht geführt worden, das vom Fenster eines nahen Gebäudes reflektiert wurde.)

In seiner Arbeit »Theorie der Doppelbrechung der Kristalle«, die er zur Lösung einer von der Pariser Akademie der Wissenschaften gestellten Preisaufgabe einreichte und 1810 veröffentlichte, beschrieb er seine Versuchsergebnisse und unternahm es, sie zu begründen.

Für *Malus* bestand das Licht aus Teilchen, doch diese zeigen, ähnlich wie winzige Magneten, bestimmte Vorzugsrichtungen oder -orientierungen. Im Licht, wie es eine Lichtquelle normalerweise ausstrahlt, sind die Teilchen regellos nach den verschiedensten Richtungen orientiert. Beim Durchgang durch bestimmte Kristalle jedoch oder bei der Reflexion werden die Teilchen ausgerichtet und weisen im wesentlichen die gleiche Orientierung auf, dieses Licht nennt *Malus* polarisiert, die davon hervorgerufenen Erscheinungen Polarisation.

Sie lassen sich mittels der Korpuskulartheorie erklären, während Erklärungsversuche unter der Annahme longitudinaler Ätherschwingungen ergebnislos blieben. Die Emanationstheorie erhielt so nochmals einen scheinbaren Auftrieb.

Allerdings währte dies nicht lange.

Der französische Straßenbauingenieur *Jean Augustin Fresnel* (1788 bis 1827) beendete sie. In einem Dorf nahe Caen begann er 1814 mit Untersuchungen auf dem Gebiet der Optik. Sein Instrumentarium war denkbar einfach – teils selbst zusammengebastelt, teils von einem Dorfschmied nach Angaben *Fresnels* hergestellt. Auch um die theoretischen Kenntnisse *Fresnels* war es anfänglich nicht zum besten bestellt. Er mußte sich die nötigen Grundlagen erst aneignen, was er in überraschend kurzer Zeit tat.

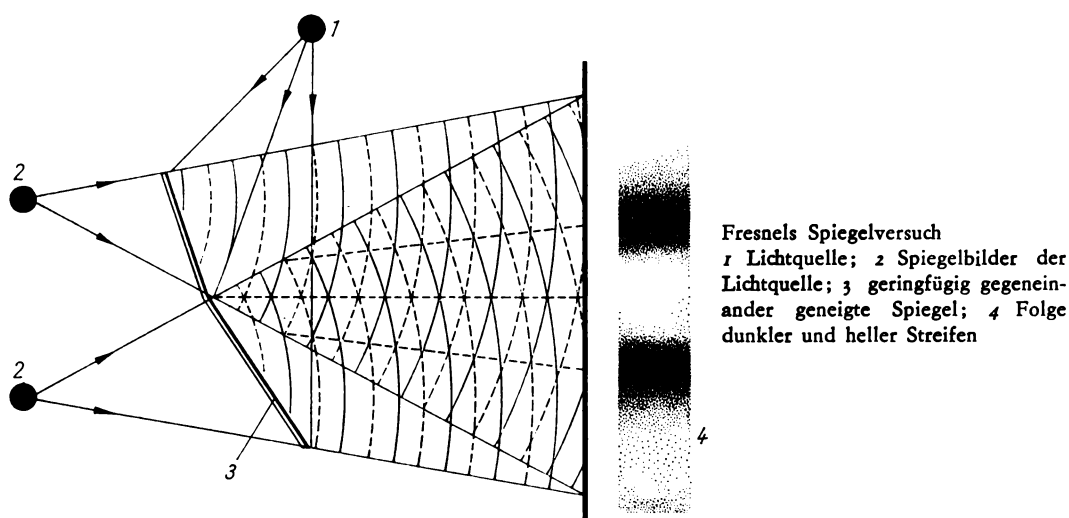
Fresnel untersuchte zunächst Beugungserscheinungen und gelangte, sie weiterführend, zur Interferenz. Bereits hier vertrat er konsequent die Wellentheorie und arbeitete unter anderem den nach ihm benannten Spiegelversuch aus.

Licht, das einen Spalt durchdringt, wird von zwei ganz geringfügig gegeneinander geneigten Spiegeln reflektiert. Die Spiegelbilder als scheinbare Lichtquellen senden dann synchrone und amplitudengleiche Lichtwellen aus. Damit hatte *Fresnel* eine bei allen Interferenzversuchen auftretende Schwierigkeit geschickt umgangen: Nur kohärentes Licht, Licht gleicher Frequenz und Phase, kann interferieren.

An den Stellen, wo zwei Wellenberge oder zwei Wellentäler zusammentrafen, entstanden Helligkeitsmaxima; wo Berg und Tal zusammenfielen, löschten die Wellen einander aus. Der Schirm, auf dem das von den Spiegeln reflektierte Licht aufgefangen wurde, zeigte infolgedessen eine Reihe dunkler und heller Interferenzstreifen. Mit Hilfe ihres Abstands (und anderen, leicht meßbaren Größen) konnte auch er Wellenlängen bestimmen.

Als viel bedeutsamer allerdings erwies sich seine Beschäftigung mit Polarisationserscheinungen.

94 War die Wellenhypothese richtig – *Fresnel* zweifelte nicht daran –, so waren Po-



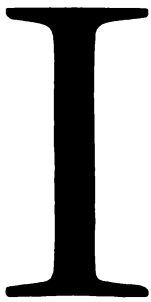
larisationserscheinungen nur möglich, wenn es sich beim Licht nicht um longitudinale, sondern um transversale, um Ätherschwingungen quer zur Ausbreitungsrichtung des Lichts, handelte. Um 1820 begann *Fresnel*, seinen Forschungen diese Arbeitshypothese zugrunde zu legen. Mit ihrer Hilfe ließen sich in der Tat die Polarisationserscheinungen qualitativ und quantitativ beschreiben.

Vor allem aber lieferte *Fresnel* auch einen experimentellen Beweis. Er zeigte, daß Interferenzerscheinungen an polarisiertem Licht nur dann auftreten, wenn die Schwingungsebenen der interferierenden Strahlen einander parallele Komponenten haben.

Damit war die Entscheidung gefallen. Die Wellenhypothese hatte den Sieg davongetragen. Ihre Gültigkeit wurde kaum noch angezweifelt. Alles, was anschließend noch unternommen wurde, galt im wesentlichen ihrer Bestätigung.

So holte man zum Beispiel nach, was zu *Newtons* und *Huygens'* Zeiten noch nicht möglich gewesen war: Man bestimmte die Lichtgeschwindigkeit und ihren Zusammenhang mit dem Brechungsgesetz für feste Stoffe und fand, daß *Huygens* im Recht gewesen war.

Unserem Jahrhundert blieb es vorbehalten zu erweisen, daß die Deutung »Licht ist ein Wellenvorgang« nicht alle Erscheinungen und Beobachtungen erklären kann, sondern – wenn auch mit Photonen statt der von *Newton* angenommenen Lichtteilchen – durch die dialektische Feststellung »sowohl Welle als auch Teilchen« ersetzt werden muß.



Unter dem Regenbogen

Immer wieder bewundern wir den Regenbogen und seine unähnlichen Farben –

Dem Physiker ist er weit mehr als ein prächtiges Naturschauspiel. Ihm sind seine Farben, das Spektrum, unentbehrliches Werkzeug. Sie halfen, Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten des Lichts zu erklären und in optischen Instrumenten anzuwenden; sie lieferten und liefern unwiderlegbare Beweise für die Erkennbarkeit der Welt.

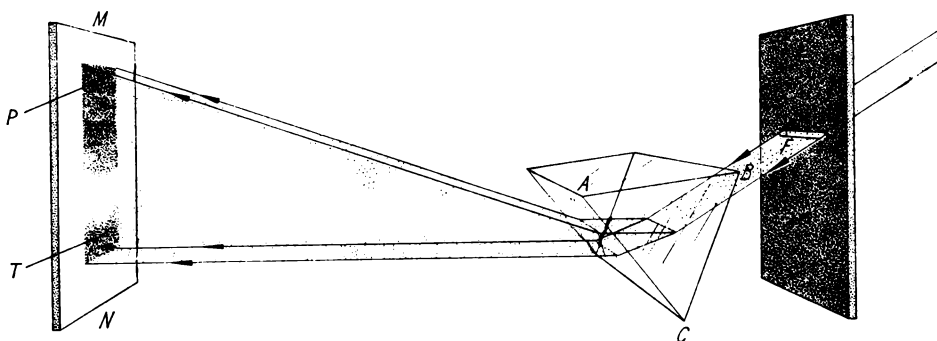
Die Farben des Spektrums sind »Botschaften aus den Atomen«, »Leuchtfeuer« auf dem schwierigen Wege zur Aufdeckung der Struktur der Materie.

Mit ihrer Hilfe können wir kleinste, unwägbare Spuren der Stoffe ebenso feststellen wie das Baumaterial entferntester Sternsysteme.

Für die ersten Schritte auf diesem Wege war nicht mehr nötig als Sonnenschein, ein dunkles Zimmer und ein Glasprisma.

Das Buch, an das wir hier anknüpfen, nannten wir bereits: Es ist *Newtons* »Optik« (s. S. 85). Schon im ersten Teil beschreibt *Newton* den Versuch, der die systematische Erforschung des Spektrums einleitete und neben anderen auch *Goethe* veranlaßte, sich auf das Gebiet der Physik zu begeben. Doch lassen wir zunächst *Newton* zu Wort kommen:

»In einem sehr dunklen Zimmer brachte ich hinter einer runden, in dem Fensterladen befindlichen Öffnung von $\frac{1}{3}$ Zoll Durchmesser ein Glasprisma an. Letzteres sollte den Lichtstrahl, der durch die Öffnung eindrang, ablenken, ihn aufwärts nach der gegenüberliegenden Wand des Zimmers werfen und dort ein farbiges Bild der Sonne erzeugen. Die Achse des Prismas, das heißt die durch die Mitte des Prismas von einem Ende zum anderen, parallel der brechenden Kante verlaufende Linie, befand sich in diesem und den folgenden Versuchen in senkrechter Stellung zu den einfallenden Lichtstrahlen. Um diese Achse drehte ich das Prisma langsam und sah dabei das farbige Sonnenbild zuerst hinab- und dann wieder hinaufsteigen. Zwischen der Ab- und Aufwärtsbewegung, in dem Augenblicke, wo das Bild stillzustehen schien, stellte ich das Prisma fest. Nun ließ ich das gebrochene Licht senkrecht auf einen Bogen weißes Papier fallen, der auf der gegenüberliegenden Wand des Zimmers angebracht war, und beobachtete Gestalt und Größe des dort entstehenden Sonnenbildes. Es war langgezogen und von zwei geraden, parallelen Linien begrenzt; die Enden waren halbkreisförmig. Seitlich war es recht scharf begrenzt, an den Enden jedoch verschwommen und undeutlich, indem das Licht dort allmählich bis zum gänzlichen Verschwinden abnahm ...



Nach Newtons »Optik«: Zerlegung des durch den Spalt *F* dringenden Lichts durch das Prisma *A-B-C* und Wiedergabe des Spektrums auf dem Schirm *M-N*

Da nun der Versuch zeigt, daß das Sonnenbild nicht rund, sondern etwa 5mal so lang als breit ist, müssen die Lichtstrahlen, die zum oberen Teile *P* gelangen, also am stärksten abgelenkt werden, von höherem Grade brechbar sein als diejenigen, die zum unteren Ende *T* gehen.

Das Spektrum *PT* war farbig, und zwar rot in seinem am wenigsten gebrochenen Ende *T*, violett dagegen in dem am stärksten abgelenkten Ende *P*. Der dazwischen befindliche Raum war gelb, grün und blau.«

Sonnenlicht ist, so schloß *Newton*, nichts Einheitliches, sondern besteht aus einem Gemisch unterschiedlichster Farben. War dieser Schluß richtig, mußte sich aus diesen Farben wieder weißes Licht zusammensetzen lassen, das alle Eigenschaften des ursprünglichen Sonnenlichts besaß, sich also beispielsweise spiegeln, beugen oder erneut zerlegen ließ.

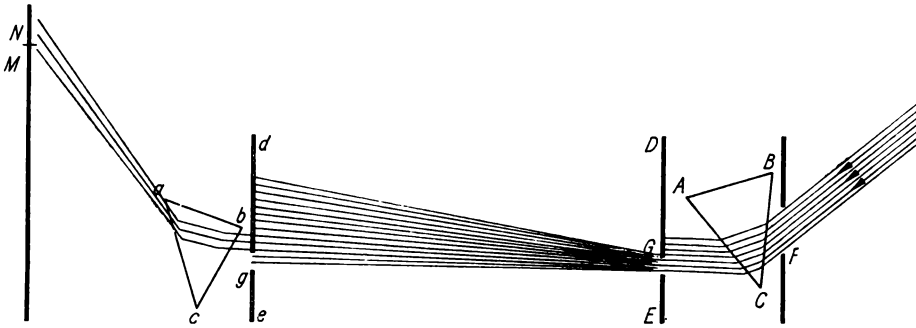
Der erste Teil dieses Versuchs war einfach ausführbar: Traf das vom Prisma zerlegte Licht auf eine Sammellinse, vereinigten sich die Strahlen nach Passieren der Linse zu einem weißen Lichtfleck. Näherte man den Karton, auf dem dieser entstand, der Linse, traten die einzelnen Farben erneut (natürlich ohne gegenseitige scharfe Grenzen) in Erscheinung, entfernte man ihn über den Vereinigungspunkt hinaus, ebenfalls, diesmal jedoch in umgekehrter Anordnung: Vor dem Vereinigungspunkt waren die Farbanteile *noch*, dahinter *wieder* getrennt.

Newton wollte aber keinen Lichtfleck, sondern einen Lichtstrahl erhalten. Deshalb stellte er ein zweites Prisma auf und drehte es um seine Längsachse, bis es die hinter dem Vereinigungspunkt auseinanderstrebenden Farbanteile erneut parallel richtete. Das Ergebnis war ein »weißer« Strahl. Mit ihm ließen sich ohne Einschränkung alle Versuche anstellen, die mit dem ursprünglichen Sonnenstrahl möglich waren.

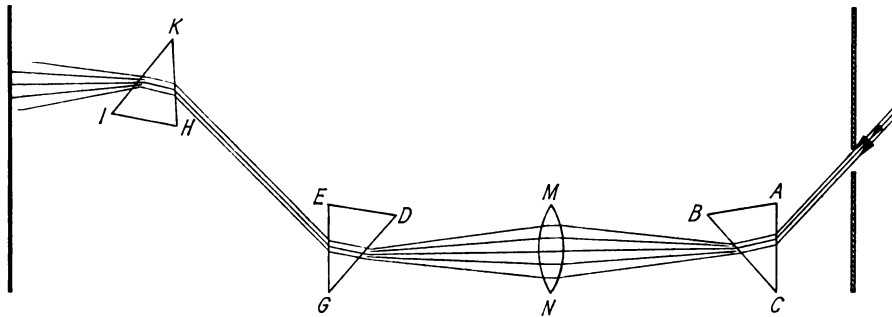
Für viele Gelehrte hieß das umdenken. Hatten sie bisher Sonnenlicht für »einfach«, farbiges Licht hingegen für »zusammengesetzt« gehalten, so erwiesen *Newtons* Experimente genau das Gegenteil. Obwohl *Newton* diese Erkenntnis durch

zahlreiche weitere Versuche, zum Beispiel über die Körperfarben (das heißt die Frage, warum uns Gegenstände farbig erscheinen) untermauerte, stieß er teilweise auf heftigen Widerspruch. Selbst hundert Jahre nach seinen Untersuchungen gab es noch Zweifler und Gegner.

Der berühmteste unter ihnen war *Goethe*. Nachdem dieser, um *Newtons* Versuche nachzuprüfen, ein Prisma auf eine Öffnung im Fensterladen gerichtet hatte, stellte er verwundert fest, daß »die durch das Prisma angeschaute weiße Wand nach wie



Nach Newtons »Optik«: Nachweis der unterschiedlichen Brechbarkeit der Spektralfarben. Wird das Prisma A-B-C um seine Längsachse gedreht, erreicht jeweils nur ein Ausschnitt des entstehenden Spektrums durch die Spalte G und g das Prisma a-b-c. Er wird erneut gebrochen und trifft den Schirm M-N an verschiedenen hoch gelegenen Stellen



Nach Newtons »Optik«: Licht wird durch das Prisma A-B-C zerlegt, durch die Sammellinse M-N wieder vereint, durch das Prisma D-E-G zu einem »weißen« Strahl zusammengefaßt und durch das Prisma H-I-K in Spektralfarben aufgespalten

vor weiß blieb, daß nur da, wo ein Dunkles dranstieß, sich eine mehr oder weniger entschiedene Farbe zeigte».

Diese Erscheinung, dadurch hervorgerufen, daß im Bild eines breiten Spalts sich gegen die Mitte hin gewissermaßen zahlreiche Einzelspektren überlagern und daher Weiß ergeben, während nur an den Rändern Farben auftreten können, war *Newton* bereits bekannt. Für *Goethe* wurde sie Ausgangspunkt des Trugschlusses, auf dem er seine Farbenlehre aufbaute:

»Es bedurfte keiner langen Überlegung, so erkannte ich, daß eine Grenze notwendig sei, um Farben hervorzubringen, und ich sprach wie durch einen Instinkt sogleich laut aus, daß die Newtonsche Lehre falsch sei.«

Für *Goethe* bildeten sich die Farben durch das Zusammentreffen von Dunkelheit und Helligkeit: »Das höchst energische Licht, wie das der Sonne . . ., ist blendend und farblos . . . Dieses Licht aber, durch ein auch nur wenig trübes Mittel gesehen, erscheint uns gelb . . .

Wird hingegen durch ein trübes von einem darauffallenden Licht erleuchtetes Mittel die Finsternis gesehen, so erscheint uns eine blaue Farbe . . .«

Das Zustandekommen der übrigen Farben erklärte *Goethe* durch Zusammentreffen verschiedener Grade von Helligkeit und Dunkelheit. Kritischen Einwürfen begegnet er lebhaft, mitunter recht aufgebracht:

»Es freut mich«, schrieb er 1811, »daß meine Farbenlehre als Zankapfel die gute Wirkung tut. Meine Gegner schmatzen daran herum, wie Karpfen an einem großen Apfel, den man ihnen in den Teich wirft. Diese Herren mögen sich gebärden wie sie wollen, so bringen sie wenigstens dieses Buch nicht aus der Geschichte der Physik heraus.«

Um ein viel zitiertes Wort zu gebrauchen: »Hier irrte *Goethe*!« Seine Farbenlehre konnte die weitere Erforschung des Lichts, insbesondere des Spektrums, weder aufhalten noch verzögern und wurde nur von wenigen Physikern – und auch das nur für kurze Zeit – ernstgenommen.

Die Beobachtung, daß das Spektrum an seinen Enden nicht plötzlich, sondern allmählich unsichtbar wird, lenkte das Interesse auf diese Enden.

Es begann mit einer Entdeckung des Astronomen *Friedrich Wilhelm Herschel* (1738 bis 1822). Um die Blendwirkung bei Sonnenbeobachtungen zu vermindern, benutzte er gefärbte Gläser und stellte überrascht fest, daß eine besonders fühlbare Wärmewirkung oft hinter Gläsern auftrat, die nur wenig Licht hindurchließen, und umgekehrt.

Herschel maß daraufhin mit Hilfe eines kleinen Thermometers die Temperaturen in den einzelnen Farbbereichen. Er fand, daß die Wärmewirkung der Sonnenstrahlung zunimmt, je näher man dem »roten Ende« des Spektrums kommt. Vor allem aber: Sie erstreckt sich bis weit jenseits des sichtbaren Teils des Spektrums. Damit wurde *Herschel* zum Entdecker der Infrarotstrahlung, deren technische Anwendung besonders in den letzten Jahrzehnten großen Aufschwung nahm.

Umgekehrt konnte der Chemiker *Carl Wilhelm Scheele* (1742 bis 1786), einer der Entdecker des Sauerstoffs, nachweisen, daß die chemische Wirkung des Sonnenlichts zum violetten Ende hin zunahm. Er benutzte für diesen Nachweis ein einfaches, aber geradezu modern anmutendes Verfahren: die Schwärzung eines mit Chlorsilber bestrichenen Papierstreifens.

1801 fand dann *Johann Wilhelm Ritter* (1776 bis 1810), daß auch die chemischen Wirkungen über das sichtbare Spektrum hinausreichen, daß sich an den violetten ein ultravioletter Bereich anschließt. Auch er sollte sich später für Wissenschaft und Technik als von größter Bedeutung erweisen.

Nur ein Jahr ~~daneben~~ ^{danach}, 1802, zeigte sich in der tausendfach beobachteten scheinbaren Lückenlosigkeit und Stetigkeit der Regenbogenfarben ein kleiner Schönheitsfehler. Der Arzt, Physiker und Chemiker *William Hyde Wollaston* (1776 bis 1828) entdeckte im Sonnenspektrum eine Anzahl dunkler Linien, von denen fünf besonders deutlich hervortraten. Er hielt sie für so etwas wie bisher übersehene Grenzlinien zwischen verschiedenen Farbbereichen und verfolgte sie nicht weiter.

Daß sie nicht für immer in Vergessenheit gerieten, sondern bald wieder von sich reden machten, ist in erster Linie das Verdienst des deutschen Optikers und Forschers *Josef Fraunhofer* (1787 bis 1826).

Frühzeitig verlor *Fraunhofer* seinen Vater, einen Glasermeister. Ein Münchener Spiegelmacher erwies dem zwölfjährigen Jungen die »Gnade«, ihn ohne das übliche Lehrgeld als Lehrling aufzunehmen. Sechs Jahre sollte *Josef Fraunhofer* dafür unentgeltlich für seinen Meister arbeiten . . .

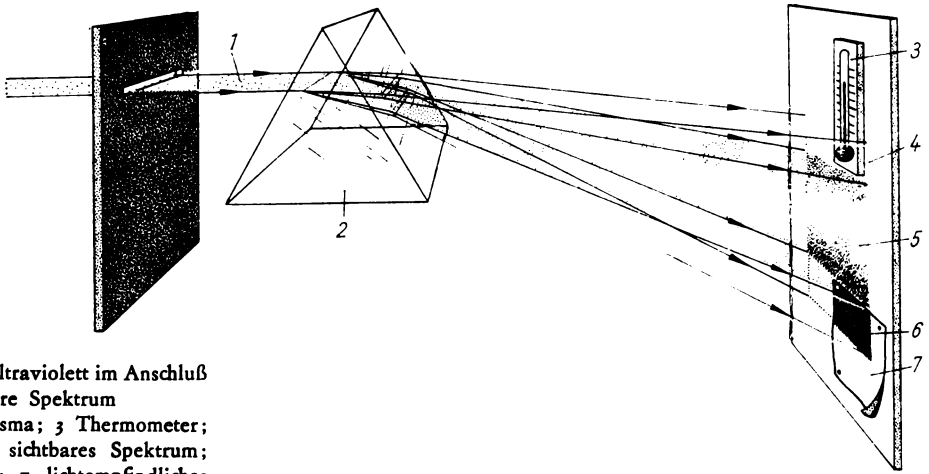
Doch ein »Unglück war sein Glück«. Das Haus seines Meisters stürzte zusammen und begrub auch *Josef Fraunhofer* unter sich. Einige über ihm verklemmte Balken retteten dem Knaben das Leben. Der bayrische Kurfürst (und spätere König) Maximilian Joseph, der die Unglücksstelle und die Bergungsarbeiten besichtigt hatte, ließ sich von dem Jungen berichten und machte ihm ein Geldgeschenk.

Fraunhofer, der inzwischen gemerkt hatte, daß er für seinen Meister zwar eine billige Arbeitskraft darstellte, seinem Wunsch, Optiker zu werden, aber um keinen Fingerbreit nähergekommen war, kaufte sich für einen Teil des Geldes eine einfache Glasschleifmaschine und begann auf eigene Faust, optische Gläser zu schleifen. Sehr bald erkannte er, daß Handfertigkeit und Fleiß allein nicht ausreichten, um optische Instrumente zu bauen, und er begann, sich im Selbststudium die nötigen mathematischen und physikalischen Kenntnisse anzueignen. Seinem Meister war dieser dem Geschäft scheinbar abträgliche Ehrgeiz ein Dorn im Auge; das Verhältnis zu seinem Lehrling wurde immer gespannter. Daher nutzte *Fraunhofer* den Rest des Geldes, um seinem Meister das letzte Halbjahr der Lehrzeit »abzukaufen«.

Als die Münchener Techniker und Unternehmer *Reichenbach* und *Utzschneider* (dieser hatte den Entwicklungsgang *Fraunhofers* aufmerksam verfolgt und ihm auch Fachliteratur empfohlen und geliehen) ein feinmechanisches Institut gründeten und Mitarbeiter für dessen optische Abteilung suchten, stellten sie den jungen *Fraunhofer* ein. Er leistete so Hervorragendes, daß man ihm bald die Leitung der optischen Abteilung übertrug.

Zwei technologische Probleme bereiteten damals den Instrumentenbauern besondere Schwierigkeiten. Es fehlten Schleifmaschinen, mit denen sich Linsen präziser Oberflächenform und hoher Oberflächengüte herstellen ließen, und es mangelte an blasen- und schlierenfreien optischen Gläsern. Es gab sie nur in England, und von dort mußten sie importiert werden.

Fraunhofer löste beide Fragen mustergültig. Er konstruierte sehr genau arbeitende Linsenschleifmaschinen und entwickelte Glassorten, mit denen sich nicht einmal



Infrarot und Ultraviolett im Anschluß
an das sichtbare Spektrum

1 Licht; 2 Prisma; 3 Thermometer;
4 Infrarot; 5 sichtbares Spektrum;
6 Ultraviolett; 7 lichtempfindliches
Papier

das optische Glas aus England messen konnte. Außerdem verbesserte oder schuf er zahlreiche optische Geräte und Hilfsmittel, unter denen sich vor allem die sogenannten Beugungsgitter für die physikalische Forschung als von unschätzbarem Wert erwiesen.

Zur systematischen Entwicklung optischer Gläser war es unumgänglich nötig, ihre Eigenschaften auf möglichst einfache Weise feststellen und messen zu können.

Um zum Beispiel die lichtbrechenden Eigenschaften zu untersuchen, nahm *Fraunhofer* Prismen aus den betreffenden Glassorten und verglich ihre Spektren. Das war jedoch wegen der stetigen Farbübergänge nicht einfach. Nirgends gab es in dem farbigen Band oder an seinen Enden eindeutig festlegbare Meßmarken, an die er sich hätte halten können.

Eine zunächst unerklärliche Beobachtung kam *Fraunhofer* zu Hilfe. Als er statt Sonnenlicht Kerzen- oder Lampenlicht zur Erzeugung des Spektrums benutzte, sah er im farbigen Band eine helle, gelbe Linie hervortreten. Sie wird, was *Fraunhofer* noch nicht wissen konnte, durch das überall in Spuren vorhandene Natrium hervorgerufen (s. u.). Auch handelt es sich bei genauer Beobachtung nicht um eine, sondern um zwei sehr dicht beieinander liegende Linien. Gleich, ob die Bildgröße verändert oder ein Prisma aus einer anderen Glassorte benutzt wurde: Stets erschien die gelbe Linie gegenüber den benachbarten Farben am gleichen Platz. Damit hatte *Fraunhofer* eine Meßmarke, die ihm das Vergleichen verschiedener Glassorten erleichterte.

Gab es ähnliche Marken, vielleicht noch mehr, auch im Sonnenlicht? Wie konnte man überhaupt das Sonnenspektrum auseinanderziehen, bis man seine Teile tatsächlich so nebeneinander sah, daß sich die einzelnen Sonnenbilder möglichst wenig überlagerten? Wir wollen nur auf zwei der von *Fraunhofer* ausgearbeiteten Verfahren eingehen.

Das durch eine Öffnung tretende Sonnenlicht ließ er zunächst in eine Sammellinse fallen, die ein verkleinertes Sonnenbild entwarf. Durch eine winzige Öffnung

wurde aus der Mitte des Sonnenbildes ein sehr feiner Strahl ausgeblendet und auf das Prisma gerichtet. *Fraunhofer* erhielt auf diese Weise ein sehr »sauberes«, aber verhältnismäßig lichtschwaches Spektrum.

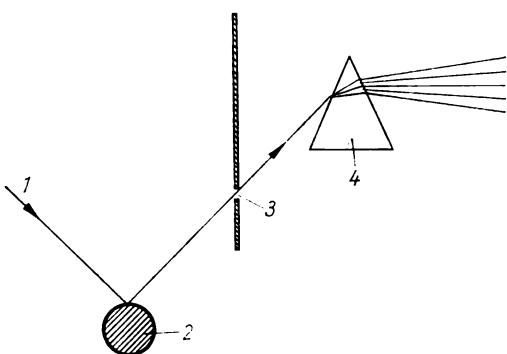
Es wurde heller, indem er das Sonnenlicht auf einem polierten Stahlzylinder zunächst eine gleißende helle Lichtlinie erzeugen ließ. Das vom Zylinder reflektierte Licht wurde durch einen langen, sehr feinen und parallel zur Zylinderachse angebrachten Spalt auf das Prisma geworfen.

Wie überrascht war *Fraunhofer*, als er erkannte, daß das Spektrum nunmehr von zahlreichen *dunklen* Linien (er zählte mehrere Hunderte) durchzogen war! Auch sie traten stets an den gleichen Stellen im Spektrum auf. *Fraunhofer* bezeichnete die am deutlichsten hervortretenden mit Buchstaben, bestimmte ihre Abstandsverhältnisse und erhielt so zahlreiche Marken zur Untersuchung lichtbrechender Substanzen.

Fraunhofer beobachtete, daß dort, wo im Flammenspektrum die gelbe Linie erschienen war, im Sonnenspektrum eine ausgeprägte dunkle Linie (von ihm »D« bezeichnet) erschien; er stellte fest, daß das Licht des Planeten Venus ein gleiches Spektrum liefert wie Sonnenlicht, während die Fixsterne davon abweichende Spektren aufweisen.

Fraunhofers Versuche wurden von vielen Physikern aufgegriffen. Es stellte sich heraus, daß glühende Festkörper ein kontinuierliches Spektrum ohne helle bzw. dunkle Linien aussandten. Im Licht des Lichtbogens hingegen traten wiederum helle Linien auf, die man schließlich den verdampfenden Elektroden zuschreiben mußte: Um Gase zu untersuchen, mußte man sie zunächst einmal zum Leuchten bringen. Hierbei halfen später vor allem »Geißlersche Röhren« (s. S. 112), in denen das zu untersuchende und verdünnte Gas durch Stromdurchgang zum Leuchten angeregt wurde. Ihr Spektrum war im wesentlichen aus leuchtenden Linien und Liniengruppen zusammengesetzt.

Der französische Physiker *Léon Foucault*, bekannt durch seine Messungen der Lichtgeschwindigkeit (s. S. 46) und seine Versuche zum direkten Nachweis der Erddrehung, fand im Spektrum eines Lichtbogens ebenfalls die gelbe Linie, die schon *Fraunhofer* entdeckt hatte, und stellte sicher, daß an der genau gleichen Stelle des Sonnenspektrums eine auffällig dunkle Linie auftrat, wenn das Sonnenlicht durch den Lichtbogen geleitet und dann zum Spektrum auseinandergezogen wurde.



Eine Versuchsanordnung Fraunhofers zur Aufhellung des Spektrums
1 Licht; 2 polierter Stahlzylinder;
3 Spalt; 4 Prisma

Was ging hier vor? Fast sah es aus, als verschlucke der Lichtbogen das Licht der »Linie D« – also gerade das Licht, das er selbst aussandte. *Foucault* war davon überzeugt, daß es sich so verhielt, doch diese, wie sich später zeigte, ungemein wichtige Schlußfolgerung wurde zunächst wenig beachtet.

Alle diese Versuche, ihre Erfolge und Mißerfolge aber bestärkten eine Vermutung. Die hellen und dunklen Linien der Spektren und ihre Anordnung schienen mit der chemischen Natur der Stoffe zusammenzuhängen, von deren Gasen oder Dämpfen das Licht ausging oder absorbiert wurde. »Verrieten« sich chemische Stoffe, vielleicht jeder Grundstoff, durch ein solches gut beobachtbares Linienspektrum? Ließ sich, sofern sich diese Vermutung bestätigte, auf dieser Basis nicht ein ganz neuartiges Analyseverfahren ausarbeiten?

Ganz neu war dieser Gedanke nicht. In der Feuerwerkerei zum Beispiel benutzte man seit langem verschiedene Salze, um Flammen zu färben. Umgekehrt hatte man von der durch bestimmte Stoffe hervorgerufenen Flammenfärbung auf das in ihnen enthaltene Metall zurückschließen können (von einer sich grün färbenden Flamme zum Beispiel auf Kupfer). Das freilich war ein recht grobes und Anlaß zu häufigen Irrtümern gebendes Verfahren, war doch oft, zum Beispiel bei Anwesenheit mehrerer Metalle, keine eindeutige Flammenfärbung zu beobachten.

Nach den Arbeiten *Fraunhofers* aber brauchte man gar nicht unmittelbar die Flamme zu beobachten, in die ein zu untersuchender und verdampfender Stoff gebracht wurde. Jetzt konnte man das von diesem erzeugte Spektrum auswerten.

Das größte Verdienst daran, diesen Gedanken zu einer der empfindlichsten und vielseitigsten Nachweismethoden für chemische Grundstoffe nicht nur auf der Erde, sondern auch im Kosmos ausgebaut zu haben, gebührt zwei deutschen Forschern, die lange Jahre gemeinsam arbeiteten und freundschaftlich miteinander verbunden waren.

Robert Wilhelm Bunsen (1811 bis 1899) war Chemiker und Physiker und gehörte zu den Begründern der physikalischen Chemie. *Gustav Robert Kirchhoff* (1824 bis 1897), Physiker, war besonders theoretisch interessiert und fand die mathematische Fassung und Durchdringung zahlreicher physikalischer Probleme. Nach 1850 nahmen beide gemeinsam die Arbeiten auf, die zur Spektralanalyse führten.

Noch vor Beginn der eigentlichen Arbeiten, während der Vorbereitungen, ersann *Bunsen* ein Hilfsmittel, das allein genügt hätte, seinen Namen in aller Welt bekannt zu machen: den nach ihm benannten Bunsenbrenner.

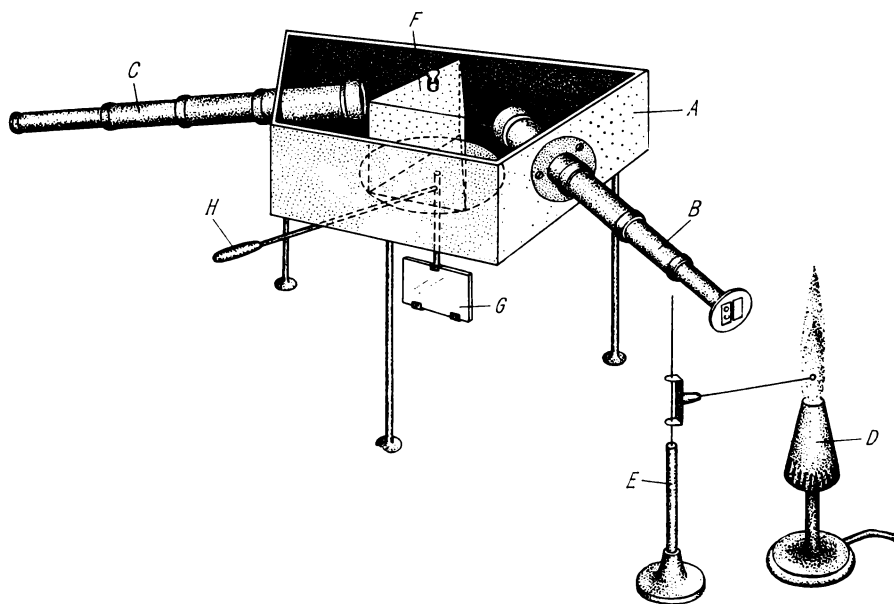
Bunsen hatte herausgefunden, daß die von glühenden Gasen erzeugten Linienspektren um so deutlicher und reiner waren, je höher die Temperatur der erhitzten Flamme war und je weniger sie selbst leuchtete. Die damals im Laboratorium benutzten Spiritus- und Gasbrenner genügten diesen Forderungen nur höchst unvollkommen. Die Verbrennung verlief in ihnen unvollständig, und sie leuchteten stark.

Bunsen löste dieses Problem auf einfache, zugleich aber äußerst wirkungsvolle Weise. Er schnitt in die Wände des die Flamme mit Gas speisenden Rohres Löcher oder Schlitze. Das vorbeiströmende Gas saugte Luft an, riß sie mit, und es entstand ein inniges Gas-Luft-Gemisch, das bei hoher Temperatur und nahezu nichtleuchtend verbrannte. Damit stand *Bunsen* ein Hilfsmittel zur Verfügung, mit dem er die zu untersuchenden Substanzen genügend erhitzen konnte.

Bei der Beschreibung der von ihm und *Kirchhoff* meistens benutzten Apparatur folgen wir seinen eigenen Worten:

»A ist ein innen geschwärzter Kasten, dessen Boden die Gestalt eines Trapezes hat und der auf drei Füßen steht; die beiden schiefen Seitenwände tragen die beiden kleinen Fernrohre B und C. Die Okularlinsen des Rohres B sind entfernt und durch eine Platte ersetzt, in der ein aus zwei Messingschneiden gebildeter Spalt sich befindet, welcher in den Brennpunkt der Objektivlinse eingestellt ist. Vor dem Spalt steht die Lampe D so, daß der Saum ihrer Flamme von der Achse des Rohres B getroffen wird. Etwas unterhalb der Stelle, wo die Achse den Saum trifft, ragt in die Flamme das zu einem kleinen Ohr gebogene Ende eines sehr feinen Platindrahtes, der von dem Träger E gehalten wird; diesem Ohr ist eine Perle der zu untersuchenden Chlorverbindung (*Bunsen* und *Kirchhoff* beziehen sich hier auf ein Experiment mit Kochsalz – Anmerkung des Autors) angeschmolzen. Zwischen den Objektiven der Fernrohre B und C steht ein Hohlprisma F von 60° brechendem Winkel, das mit Schwefelkohlenstoff gefüllt ist. Das Prisma ruht auf einer Messingplatte, die um eine vertikale Achse drehbar ist. Diese Achse trägt an ihrem unteren Ende den Spiegel G und darüber den Arm H, der als Handhabe dient, um das Prisma und den Spiegel zu drehen. Gegen den Spiegel ist ein kleines Fernrohr gerichtet, welches dem hindurchblickenden Auge das Spiegelbild einer in geringer Entfernung aufgestellten horizontalen Skala zeigt. Durch Drehung des Prismas kann man das ganze Spektrum der Flamme bei dem Vertikalfaden des Fernrohres C vorbeiführen und jede Stelle des Spektrums mit diesem Faden zur Deckung bringen. Einer jeden Stelle des Spektrums entspricht eine an der Skala zu machende Ablesung.«

Das erste Spektrometer von Bunsen und Kirchhoff



Mit dieser Anordnung untersuchten die beiden Forscher immer wieder neue Verbindungen der einzelnen Metalle, aber nicht nur das. Um sicher zu sein, daß der Einfluß der die Substanzen erhaltenden Flamme die Resultate nicht verfälschte, wurden zu ihrer Erzeugung außer der Gasflamme des Bunsenbrenners Flammen zahlreicher anderer brennbarer Stoffe verwendet: Schwefel, Schwefelkohlenstoff, Alkohol, Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Knallgas. Schließlich konnte *Bunsen* feststellen:

»Bei dieser umfassenden, zeitraubenden Untersuchung . . . hat sich herausgestellt, daß die Verschiedenheit der Verbindungen, in denen die Metalle angewandt werden, die Mannigfaltigkeit der chemischen Vorgänge in den einzelnen Flammen und der ungeheure Temperaturunterschied dieser letzteren keinen Einfluß auf die Lage der den einzelnen Metallen entsprechenden Spektrallinien ausübt.«

Die Untersuchung des Linienspektrums war also immer eindeutig. In welcher Verbindung sich auch ein chemischer Grundstoff (bei *Bunsen* und *Kirchhoff* zunächst Metalle) verbarg, auf welche Weise, mit welcher Flamme und bis zu welcher Temperatur er erhitzt wurde – stets ergab sich das gleiche Spektrum. Tauchte umgekehrt ein bereits bekanntes Spektrum auf, konnte man mit Gewißheit auf die Anwesenheit des zugehörigen Grundstoffs in der zu untersuchenden Substanz schließen.

Mehr noch: Ein Spektrum, das sich mit keinem anderen vergleichen ließ, mußte das Spektrum eines bisher unbekannten Grundstoffs sein. *Bunsen* und *Kirchhoff* entdeckten so die Elemente Rubidium und Cäsium, und bereits 1867 kannte man vier Elemente, deren Existenz erst mit Hilfe der Spektralanalyse nachgewiesen worden war.

Das Linienspektrum besaß aber noch einen zweiten Vorteil. Es wurde bereits durch Stoffspuren hervorgerufen, die sich wegen ihrer Winzigkeit jeder anderen Nachweismethode entzogen. *Bunsen* beschreibt einen Versuch, bei dem die Natriumlinie bereits durch den dreimillionsten Teil eines Milligramms Natrium hervorgerufen wird, und fährt fort:

»Bei einer solchen Empfindlichkeit der Reaktion wird es begreiflich, daß nur selten in glühender, atmosphärischer Luft die Natriumreaktion fehlt. Die Erde ist auf mehr als zwei Drittel ihrer Oberfläche mit einer Kochsalzlösung (Kochsalz ist eine Natriumverbindung – Anmerkung des Autors) bedeckt, die von den sich überstürzenden Meereswogen unaufhörlich in Wasserstaub verwandelt wird. Die Meerwassertröpfchen, welche auf diese Weise in die Atmosphäre gelangen, verdunsten und hinterlassen kochsalzhaltige Sonnenstäubchen, die zwar einen der Größe nach wechselnden, aber wie es scheint, nur selten fehlenden Gemengteil der Atmosphäre ausmachen . . .

. . . Ein haarförmiger Platindraht, den man durch Ausglühen von jeder Spur einer Natriumverbindung befreite, zeigt die Reaktion auf das Deutlichste wieder, wenn man ihn einige Stunden der Luft ausgesetzt hat. Nicht minder zeigt sie der Staub, der sich in den Zimmern aus der Luft absetzt, daß z. B. das Abklopfen eines bestaubten Buches schon genügt, um in einer Entfernung von mehreren Schritten das heftigste Aufblitzen der Natriumlinie zu bewirken.«

Verstehen wir nun, warum eine Gasflamme sich gelb färbt, wenn in ihrer Nähe mit Kochsalz oder auch nur mit einem Waschmittel hantiert wird?

Zusammenhänge zwischen den dunklen Linien des Sonnenspektrums und den hellen Linien eines leuchtenden Gases oder glühenden Dampfes hatten sich bereits angedeutet. Besonders *Kirchhoff* ging ihnen nach und stellte sich zunächst eine geeignete Versuchseinrichtung zusammen.

»Zur genauen Bestimmung der Spektrallinien der einzelnen Elemente bieten die dunklen Linien des Sonnenspektrums ein unschätzbares Hilfsmittel dar. Um dieses benutzen zu können, habe ich vor der oberen Hälfte des Spaltes meines Spektralapparates zwei kleine, rechtwinklige Glasprismen so angebracht, daß, während durch die untere Spalthälfte Sonnenstrahlen direkt eintreten, durch die obere die Strahlen einer seitlich aufgestellten künstlichen Lichtquelle nach zweimaliger, totaler Reflexion zu den großen Prismen des Spektralapparates gelangen. Während so in der oberen Hälfte des Gesichtsfeldes des astronomischen Beobachtungsfernrohres das Sonnenspektrum sich zeigte, kam in der unteren, in unmittelbarem Anschluß an dieses, das Spektrum der künstlichen Lichtquelle zum Vorschein. So ließ sich die Lage der dunklen Linien des einen zu den hellen des anderen mit Sicherheit bestimmen.«

Auch *Kirchhoff* beobachtet, daß die D-Linie *Fraunhofers* an genau der gleichen Stelle des Spektrums liegt wie die Natriumlinie im leuchtenden Linienspektrum. Er läßt nun seinen Apparat ein »mäßig helles« Sonnenspektrum entwerfen und bringt eine Natriumflamme vor den Spalt – »dabei sah ich die dunklen Linien D sich in helle verwandeln. . . .«

»Um zu finden, wie weit die Lichtstärke des Sonnenspektrums sich steigern ließe, ohne daß die Natriumlinien aus dem Auge verschwänden, ließ ich den vollen Sonnenschein durch die Natriumflamme auf den Spalt fallen und sah da zu meiner Verwunderung die dunklen Linien D in außerordentlicher Stärke hervortreten. Ich ersetzte das Licht der Sonne durch das Drummondsche Kalklicht, dessen Spektrum wie das Spektrum eines jeden glühenden oder festen Körpers keine dunklen Linien hat. Wurde dieses Licht durch eine geeignete Kochsalzflamme geleitet, so zeigten sich in dem Spektrum dunkle Linien an Stelle der Natriumlinie . . .

Diese Erscheinungen finden eine leichte Erklärung in der Annahme, daß eine Natriumflamme solche Strahlen absorbiert, die sie selber aussendet, für alle anderen aber durchsichtig ist.«

Die gleiche »Umkehrung der Spektrallinien« sucht und findet *Kirchhoff* auch für andere Grundstoffe. Jedes Element absorbiert Licht der Farbe, die es selbst aussendet. Warum das so ist, konnte *Kirchhoff* noch nicht erklären; erst die weitere Erforschung des Atoms ermöglichte eine Antwort. Nach den D-Linien nahm sich *Kirchhoff* vor allem die zahlreichen Linien des Eisens vor. Auch ihnen entsprachen dunkle Linien im Sonnenspektrum.

»Die beobachtete Tatsache erklärt sich aber durch die Annahme, daß die Lichtstrahlen, welche das Sonnenspektrum geben, durch Eisendämpfe gegangen sind und hier die Absorption erlitten haben, welche Eisendämpfe ausüben müssen . . . Die Beobachtungen des Sonnenspektrums scheinen mir die Gegenwart von Eisendämpfen in der Sonnenatmosphäre mit einer so großen Sicherheit zu beweisen, wie sie in den Naturwissenschaften überhaupt erreichbar ist.

Nachdem so die Gegenwart eines irdischen Stoffes in der Sonnenatmosphäre festgestellt und dadurch eine große Zahl Fraunhoferscher Linien erklärt ist, liegt die

Vermutung nahe, daß auch andere irdische Stoffe sich dort befinden und durch die Absorption, welche sie ausüben, andere Fraunhofersche Linien hervorbringen. . . .

. . . Um die dunklen Linien des Sonnenspektrums zu erklären, muß man annehmen, daß die Sonnenatmosphäre einen leuchtenden Körper umhüllt, der für sich allein ein Spektrum ohne dunkle Linien geben würde. Die wahrscheinlichste Annahme, die man machen kann, ist die, daß die Sonne aus einem festen oder tropfbar flüssigen, in der höchsten Glühhitze befindlichen Kern besteht, der umgeben ist von einer Atmosphäre von etwas niedrigerer Temperatur.«

Kirchhoff hatte im wesentlichen richtig vermutet, und die Linienumkehrung konnte sogar an der Sonne selbst nachgewiesen werden. Wird, zum Beispiel bei einer totalen Sonnenfinsternis, das Licht des Sonnenkörpers für kurze Zeit abgedeckt, während Teile der Sonnenatmosphäre sichtbar bleiben, kehren sich die dunklen Linien um und erscheinen als helle Linien auf dunklem Hintergrund. Aus dem normalerweise zu sehenden »Absorptionsspektrum« wird ein »Emissionsspektrum« – nicht anders, als man es bei Laboratoriumsversuchen beobachtet hatte.

U

Unerschöpfliches Teilchen

Unter den elementaren Bausteinen der Materie zählt das Elektron zu den am längsten bekannten und vielseitigsten. »Ebenso unerschöpflich wie das Atom« hat *Lenin* es vor einem guten Menschenalter genannt. Immer wieder erleben wir, wie mannigfach sich diese Voraussage bestätigt.

Die Erforschung des Elektrons, die Untersuchung seiner Eigenschaften stand nicht nur am Anfang der Atom- und Kernphysik, erklärte nicht nur die Vorgänge bei der Stromleitung sowie zahlreiche andere physikalische Phänomene, sondern erwies sich auch als äußerst wichtig für die Deutung von Prozessen, die Chemiker lange als ihre urreigenste Domäne betrachtet hatten.

Die Elektrotechnik mit ihren Generatoren, Motoren und Lampen, die elektrochemische Industrie, Telegraf und Telefon wären über Anfänge nicht hinausgekommen, hätte man nicht parallellaufend zu ihrer Entwicklung das Elektron erforscht.

Die Elektronik schließlich, von der Nachrichten- bis zur Mikroelektronik, von der Medizin bis zur Raumfahrt, zeigt bereits mit ihrem Namen, daß sie auf den Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten des Elektrons beruht.

Die Erforschung des Elektrons zählt zu den größten und für die Technik folgenreichsten Leistungen der Physik.

Die Frage »was ist eigentlich Elektrizität?« wurde gestellt, seit man, tastend zunächst, elektrische Erscheinungen untersuchte – die gegenseitige Anziehung oder Abstoßung mancher geriebener Körper, die knisternden Funken am Elektrophor, den Schlag beim Berühren einer Leidener Flasche, den Blitz, die tanzenden Froschschenkel *Galvanis*.

Ist, so fragte man, die Elektrizität eine sehr feine Substanz, vielleicht ein Gas, die beim Reiben aus den Körpern tritt und so die Wirkungen hervorruft?

Der englische Arzt und Naturforscher *William Gilbert* und *Benjamin Franklin* (s. S. 52) waren dieser Ansicht.

Andere sprachen und schrieben von einem unwägbaren, nichtmateriellen Fluidum, einem »elektrischen Prinzip«, das den Stoffen eigen sei, und beriefen sich unter anderem darauf, daß keinerlei Masseunterschied zwischen geladenen und ungeladenen oder zwischen positiv und negativ geladenen Körpern festzustellen sei.

Auch die rasche Entwicklung der Elektrizitätslehre in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts beseitigte die Unklarheiten darüber nicht, was Elektrizität sei. Zwar verglich man den etwa von einem galvanischen Element verursachten und ununterbrochen fließenden Strom immer häufiger mit einem aus Abermillionen

winziger Tröpfchen zusammengesetzten Flüssigkeitsstrom – was aber strömte, wußte niemand. Immerhin gewann der Gedanke an kleinste elektrische Teilchen allmählich an Boden. Manche Physiker vermuteten sogar, jedes Atom eines Stoffes sei mit einem »Elektrizitätsatom« verbunden.

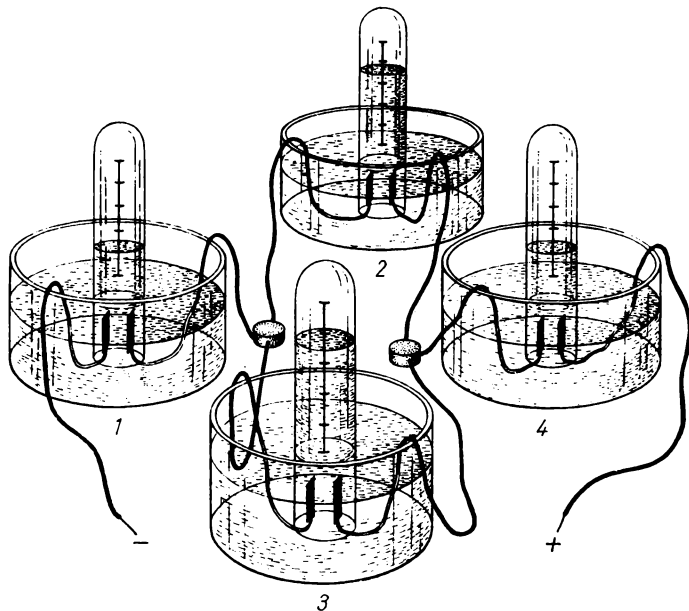
Besonders die elektrochemischen Erscheinungen stützten diese Vermutung. Flüssigkeiten erfuhren, wenn man elektrischen Strom hindurchfließen ließ, chemische Veränderungen. Aus chemischen Verbindungen konnten mit Hilfe des elektrischen Stroms bislang unbekannte Grundstoffe isoliert werden; Metalle wurden in einer Flüssigkeit unter dem Einfluß des elektrischen Stroms von einer Elektrode abgetragen, zur anderen transportiert und dort wieder abgeschieden.

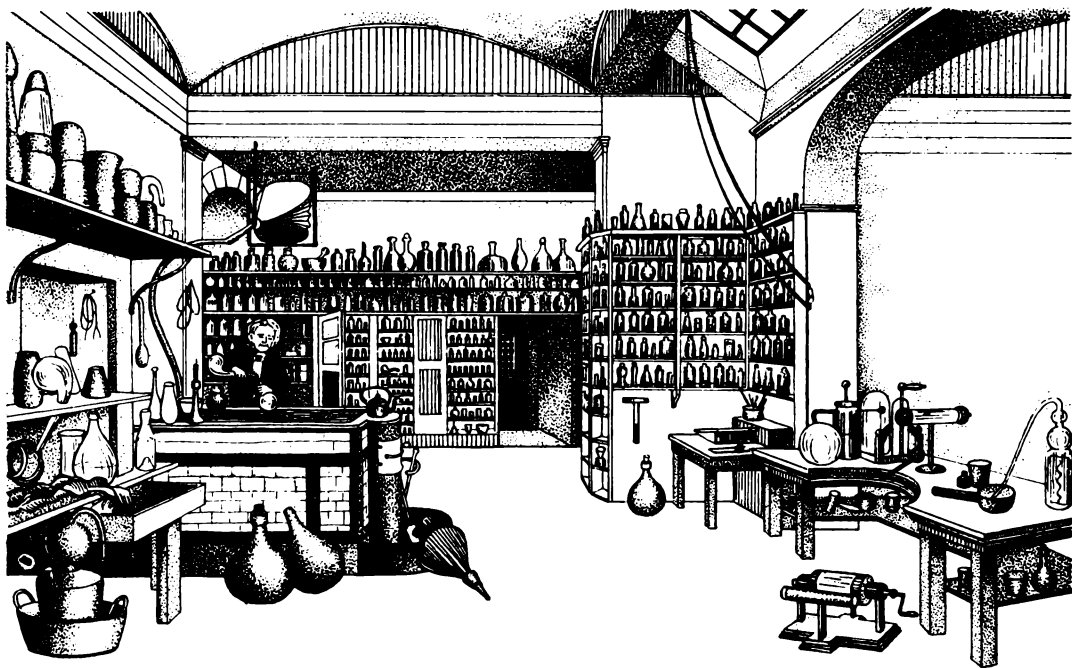
Die nähere Untersuchung dieser Erscheinungen – besonders *Michael Faraday* (1791 bis 1867) war daran beteiligt – ergab, daß zwischen den bei elektrochemischen Vorgängen transportierten Stoffmengen und den daran beteiligten Elektrizitätsmengen eindeutige, unveränderbare Zahlenbeziehungen bestanden. Setzte man voraus, daß die chemischen Stoffe aus Molekülen bestünden beziehungsweise aus Atomen zusammengesetzt seien, war die naheliegendste Deutung, jedem Atom, jedem Molekül bei elektrochemischen Vorgängen eine bestimmte Elektrizitätsmenge zuzuteilen.

Verkörperten vielleicht diese Elektrizitätsmengen so etwas wie Elektrizitätsatome? Zu entscheiden war diese Frage damals nicht. Immerhin gelang es, einen Wert für eine elektrische Elementarladung zu errechnen; außerdem konnte man Gesetzmäßigkeiten formulieren, die für die elektrochemische Industrie größte Bedeutung erlangten.

Was aber geschah, wenn Strom durch feste Körper, zum Beispiel durch einen metallischen Leiter, floß? Und warum waren manche Stoffe gute, andere hingegen schlechte Leiter? Hier blieben die Kenntnisse jahrzehntelang auf eine leicht zu

Faraday untersucht quantitative Beziehungen bei der Elektrolyse: In den Zersetzungsgefäßen 2 und 3 (halbe Stromstärke) wird in gleichen Zeiten die halbe Gasmenge wie in 1 und 4 entwickelt





Faraday in seinem Laboratorium in der Royal-Institution in London

beobachtende Feststellung beschränkt: Weder chemische Veränderungen noch irgendein Stofftransport waren nachzuweisen, wenn Strom durch einen Leiter floß. Was im einzelnen vor sich ging, enträtselten erst Physiker des 20. Jahrhunderts. Der Lösung dieses Rätsels verdanken wir unter anderem die Halbleitertechnik samt ihren weitestreichenden Auswirkungen.

Damals schien es zunächst einfacher, elektrische Erscheinungen in Gasen, im luftverdünnten oder auch luftleeren Raum zu untersuchen. Daß Luft für Elektrizität kein unüberwindliches Hindernis ist, bewies jeder Funke, jeder Blitz. Auch hatte man in England bereits um 1700 ein merkwürdiges Leuchten im Inneren teilweise luftleer gepumpter Glaskugeln bemerkt, wenn man diese rieb und so elektrisch auflud (solche Glaskugeln waren Bestandteil vieler Elektrisiermaschinen). Der Leipziger Hochschullehrer *Johann Heinrich Winkler* (1703 bis 1770) griff diese Beobachtungen auf und nutzte sie in teilweise evakuierten, mitunter bizarr geformten Glasröhren für aufsehenerregende Demonstrationen, in denen wir Vorläufer der heute verbreiteten Werbebeleuchtungen sehen können.

So eindrucksvoll solche Erscheinungen manchmal waren – erst in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts begann man, sie systematisch zu untersuchen. Die Anfänge sind vor allem mit den Namen *Julius Plücker* (1801 bis 1868), *Heinrich Geißler* (1814 bis 1879) und *Wilhelm Hittorf* (1824 bis 1914) verknüpft.

Ihre Versuchsanordnung, deren wichtigster Teil als Geißlersche Röhre noch heute Stichwort in den meisten Physikbüchern ist und an den geschickten Glasbäser, Mechaniker und Experimentator *Geißler* erinnert, war recht einfach.

In den Enden einer langgestreckten, weiten Glasröhre wurden Metallplättchen als Elektroden eingeschmolzen und durch je einen Draht mit einer Spannungsquelle verbunden, zum Beispiel mit einer Elektrisiermaschine. Über einen Pumpstutzen konnte Luft aus der Röhre entfernt oder ein anderes Gas eingefüllt werden.

Die Luftpumpe mußte schon eine Weile in Betrieb sein, ehe sichtbar wurde, daß im Inneren der Röhre etwas vor sich ging. Wenn der Innendruck nur noch etwa den zwanzigsten Teil des Außendrucks ausmachte, zog sich ein schmales, rötlich-violettes Lichtband durch die Röhre. Die starke Wärmeentwicklung, Begleitererscheinung jedes elektrischen Funkens, fehlte.

Pumpte man weiter, änderte sich das Bild ständig.

Das Lichtband verbreiterte sich, seine Farbe spielte allmählich mehr ins Rötliche. Vor der negativen Katode bildete sich ein dunkler Raum, während unmittelbar über der Katodenoberfläche eine glimmende Haut erschien. In der Röhre selbst teilte sich das Leuchten quer zur Röhrenachse in mehrere Schichten.

Auch die Natur des Füllgases hatte Einfluß. Stickstoff ergab ein kräftig rotgelbes, Wasserstoff rotes Leuchten, während Quecksilberdampf den Innenraum grünlich aufleuchten ließ. Die Form der Röhre war nebensächlich – bald schon tauchten bizarr gebogene Geißlersche Röhren auf, deren Nachfahren wir heute als Werbeleuchtschriften kennen.

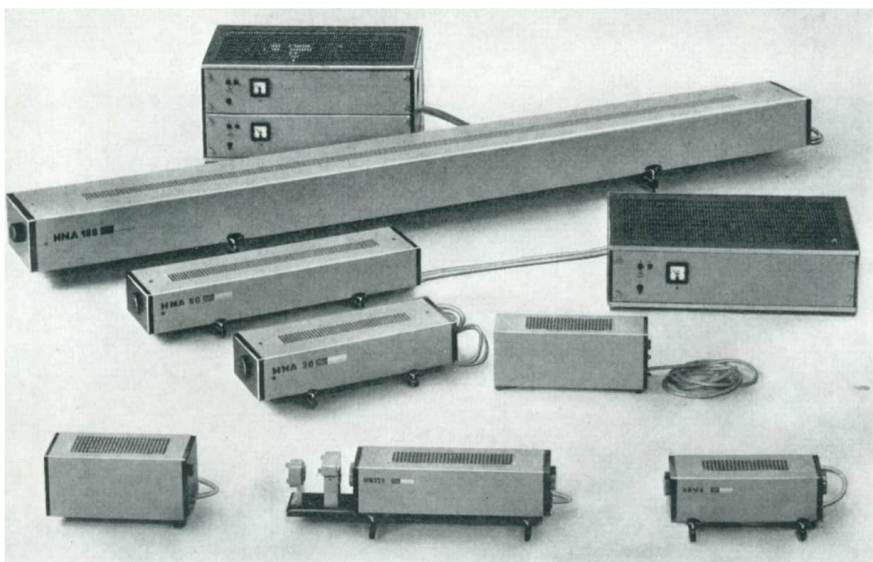
Dieses Leuchten, diese Farben waren erstaunlich. Was aber mußte sich erst zeigen, wenn man den Druck weiter senkte, die Luft nahezu völlig aus der Röhre entfernte!

Wieder arbeiteten die Pumpen – stundenlang. Das Resultat war zunächst enttäuschend. Bei weniger als einem Tausendstel des Atmosphärendrucks nahmen die Leuchterscheinungen wieder ab, wurden unauffälliger, bei noch niedrigeren Drücken verschwanden sie. Immerhin nicht spurlos. Denn nun beobachtete man ein neues Phänomen. Die der Katode, der mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbundenen Elektrode, gegenüberliegende Röhrenstirnwand fluoreszierte grünlich.

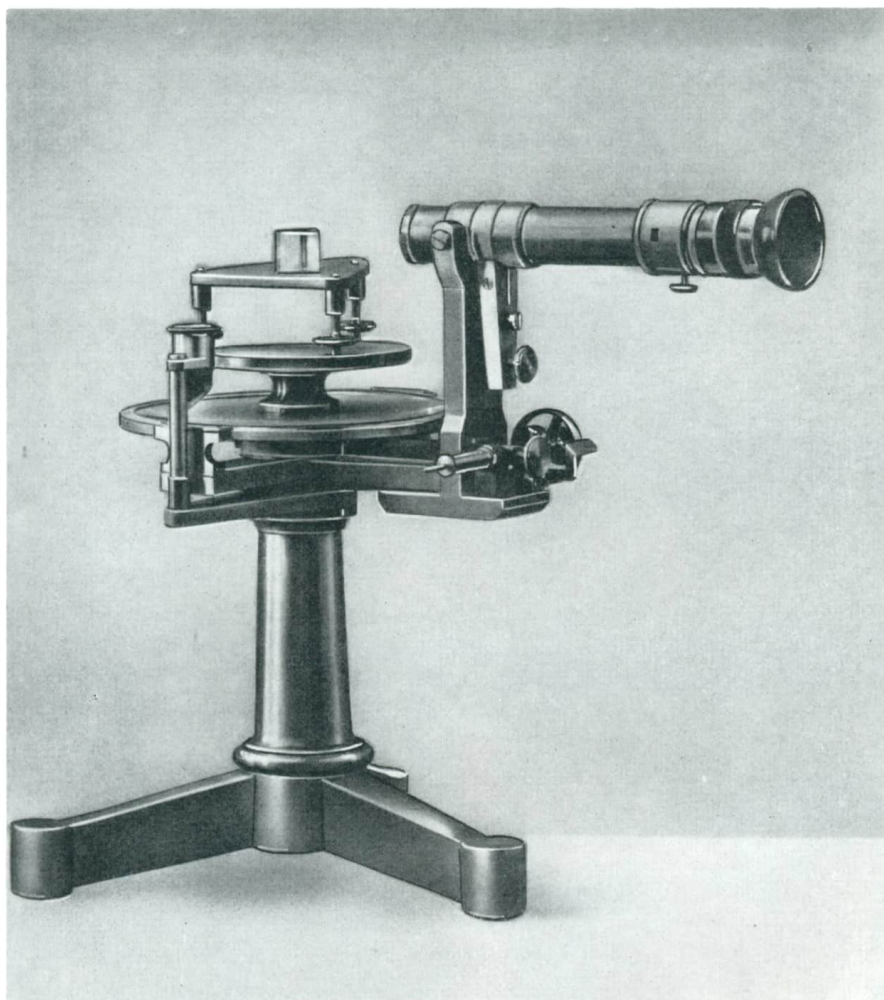
Was brachte die Glaswand zum Leuchten? Was ging dabei im Inneren der Röhre vor? Jahre verstrichen, ehe man sich dieser Frage ernsthaft zuwandte. Die Technik war währenddessen nicht stehengeblieben.

Man verfügte über Funkeninduktoren als zuverlässige Spannungsquellen und über leistungsfähige Luftpumpen, hatte gelernt, auch schwächste Ströme zu messen. Trotzdem – einfach war *a*. Aufgabe nicht, die man sich nun stellte: Die einzige Spur des Unbekannten, nach dem man suchte, war der fluoreszierende Fleck, der mit dem Ein- und Ausschalten der Spannungsquelle erschien und wieder verschwand. Man begann, bekannte Beobachtungen zu sichten und auszuwerten, weitere zu »provozieren«.

Stets leuchtete die der Katode gegenüberliegende Glaswand. Wurde die Anode zwischen beiden angebracht, warf sie einen Schatten, während sich Lochblenden vor der Katode durch einen entsprechenden Leuchtfleck auf der Glaswand abzeichneten.

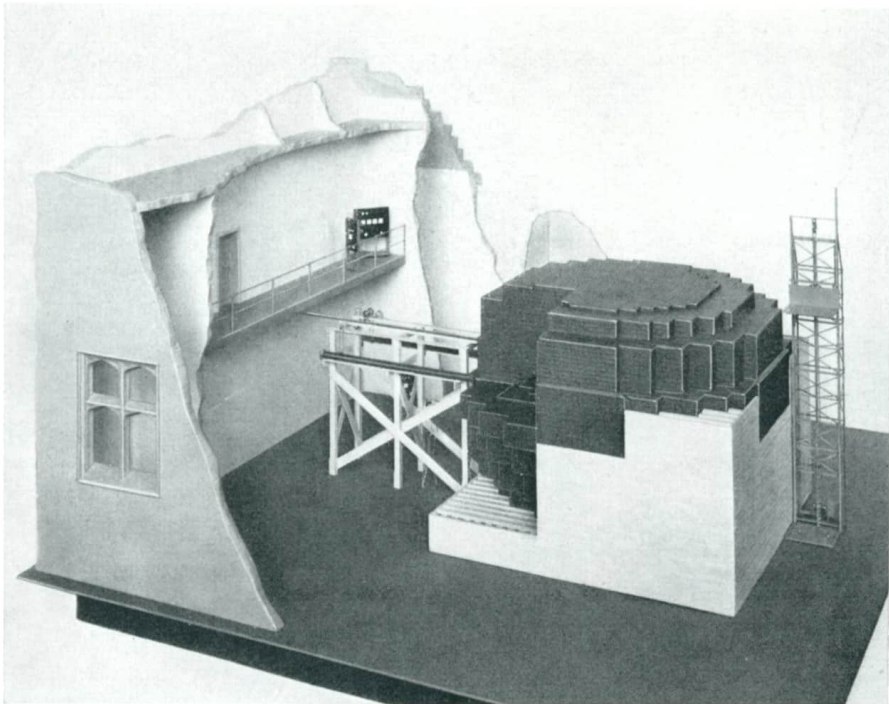


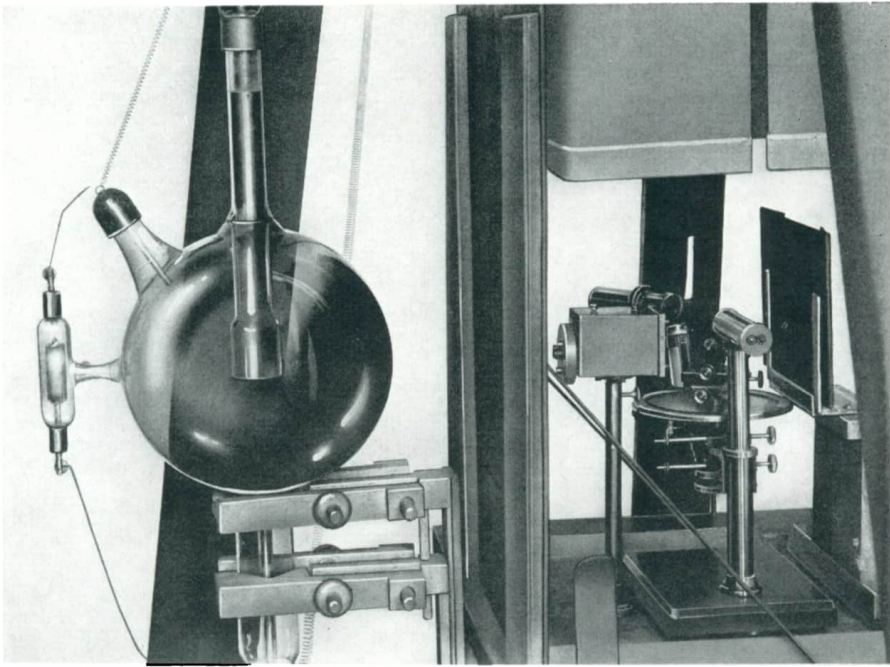
Laser: eines der weitestreichenden Beispiele für die jüngste Entwicklung von Physik und Technik (Helium-Neon-Lasertypenreihe aus dem VEB Carl Zeiss Jena). Foto: VEB Carl Zeiss Jena



Abbe-Spektrometer aus dem Jahre
1874. Foto: VEB Carl Zeiss Jena

Modell des ersten Kernreaktors der
Welt
(Chicago-Pile von E. Fermi, 1942).
Foto: Deutsches Museum München





Versuchsanordnung, mit der M. v. Laue, W. Friedrich und P. Knipping 1912 die Interferenz der Röntgenstrahlen entdeckten. Foto: Deutsches Museum München

Sah das nicht aus, als trete »etwas« aus der Katode, flöge wie ein Kugelhagel oder auch wie Lichtstrahlen durch die Röhre und bringe – vielleicht infolge des Aufpralls – das Glas zum Fluoreszieren? Dieses hypothetische Etwas, dem 1876 der Physiker *Eugen Goldstein* (1850 bis 1930) den Namen »Katodenstrahlen« gab, galt es nunmehr Schritt für Schritt zu ergründen.

Katodenstrahlen traten senkrecht aus der Katode; formte man diese zu einem kleinen Hohlspiegel, vereinigten sie sich im Brennpunkt und erzeugten dort eine solche Hitze, daß man in einer tiegelförmigen, am Brennpunkt angebrachten Anode Substanzen zum Glühen bringen und schmelzen konnte. In jüngster Zeit erst wird diese alte Beobachtung genutzt, um in Elektronenstrahlöfen Metalle unter extrem reinen Bedingungen zu erschmelzen.

Nicht nur Wärmewirkung, sondern auch mechanische Kräfte übten die Strahlen aus: Leicht drehbare Flügelrädchen im Inneren einer Geißlerschen Röhre rotieren unter ihrem Einfluß.

Die größte Überraschung aber war, daß der fluoreszierende Fleck nicht an seinen Platz gegenüber der Katode gefesselt blieb, sondern verschoben werden konnte.

Näherte man der Geißlerschen Röhre einen Magneten, glitt der Fluoreszenzfleck zur Seite; durch geeignete Bewegung eines kräftigen Magneten konnte man ihn auf der Röhrenstirnwand beliebig hin- und herführen. Das Magnetfeld lenkte also die Katodenstrahlen ab, und zwar, wie sich herausstellte, nach gleichen Regeln, die auch ein aus negativ elektrisch geladenen Teilchen bestehender Strom befolgt haben würde.

Ein elektrisches Feld beeinflußt den Katodenstrahl ebenfalls. Ließ man ihn durch zwei parallel zu seiner Ausbreitungsrichtung angebrachte Platten treten und legte man an diese eine nicht zu niedrige elektrische Spannung, wurde der Strahl zur positiven Platte hin »verbogen«, auch diesmal nach Gesetzmäßigkeiten, die für negativ elektrisch geladene Teilchen bereits seit langem bekannt waren.

Fügen wir ein, daß die Ablenkbarkeit des Katodenstrahls heute schwerlich aus der Technik wegzudenken ist. Ohne sie gäbe es weder die Bildröhre des Fernsehempfängers noch eine elektronische Fernsehkamera, weder ein Radargerät noch das Elektronenstrahloszilloskop mit seinen Anwendungen in zahlreichen Zweigen der Meßtechnik.

Damals aber, im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts, ging es nur um die Frage: Was sind (sofern der Name überhaupt berechtigt war) Katodenstrahlen?

Eine Reihe von Physikern, unter ihnen *Goldstein* und *Heinrich Hertz* (s. S. 129), hielten sie für eine dem Licht verwandte Wellenstrahlung. Andere – unter ihnen vor allem der Engländer *William Crookes* (1832 bis 1919) – sprachen sich für eine Teilchenstrahlung, für einen Hagel kleinster Teilchen, aus. Für diese wurde Anfang der neunziger Jahre der Name »Elektronen« geprägt.

Crookes stellte sich anfänglich vor, die Katodenstrahlen bestünden aus Molekülen oder Molekülteilchen der in die Röhre eingeschlossenen Gasreste, vielleicht auch aus Teilchen der Katode, die von dieser abgestoßen würden und beim Aufprallen auf das Glas Fluoreszenz hervorriefen.

Bald schon aber mußte man einsehen, daß beide Vorstellungen – die von Molekülen oder Molekülteilchen und die der Wellenstrahlung – zu unlösbaren Widersprüchen führten.

Die Wellenvorstellung vertrug sich schlecht mit der Ablenkung der Katodenstrahlen im magnetischen und elektrischen Feld nach Gesetzen der Elektrizitätslehre.

Die Vermutung, es handle sich um Moleküle oder Molekülteilchen, jedenfalls also um Teilchen nicht kleiner als ein Atom, war nicht mehr aufrechtzuerhalten, als es *Philipp Lenard* (1862 bis 1947) – außer durch seine Arbeiten zur Atomphysik leider auch durch gehässige Angriffe gegen *Röntgen* und *Einstein* und später als eingefleischter Faschist bekannt – gelang, Katodenstrahlen durch ein hauchdünnes Aluminiumfenster aus der Geißlerschen Röhre in Luft übertreten zu lassen. Wie konnten Teilchen in der Größenordnung von Molekülen oder Atomen ohne nennenswerten Widerstand eine Schicht durchdringen, die in umgekehrter Richtung die Geißlersche Röhre gegen Luftteilchen abschloß? Nicht weniger wichtig war eine weitere Folgerung aus den Lenardschen Versuchen: Ihre Resultate zwangen zu dem Schluß, daß fast die gesamte Masse eines Atoms auf sehr kleinem Raum zusammengedrängt ist.

Bestanden die Katodenstrahlen doch aus »subatomaren« elektrisch geladenen Teilchen, aus Teilchen, viel kleiner als ein Atom, die das Lenardsche Fenster zwar mühelos durchdrangen, im Luftraum davor aber, wie Versuche zeigten, rasch abgebremst wurden?

Um das zu klären, galt es vor allem zu prüfen, ob Katodenstrahlen tatsächlich elektrische Ladungen mit sich führten oder nicht.

Diesen Nachweis erbrachte 1895 der französische Chemiker und Physiker *Jean Perrin* (1870 bis 1942). Er knüpfte an Bekanntes an. Seit Beginn der Elektrizitätslehre hatte man elektrische Ladungen durch ihre anziehenden und abstoßenden Wirkungen nachgewiesen, indem man sie etwa die Blättchen eines Elektroskops sich spreizen oder den Zeiger eines Elektrometers sich drehen ließ. Diese Methode sollte sich auch auf die in Katodenstrahlen vermuteten elektrischen Teilchen anwenden lassen.

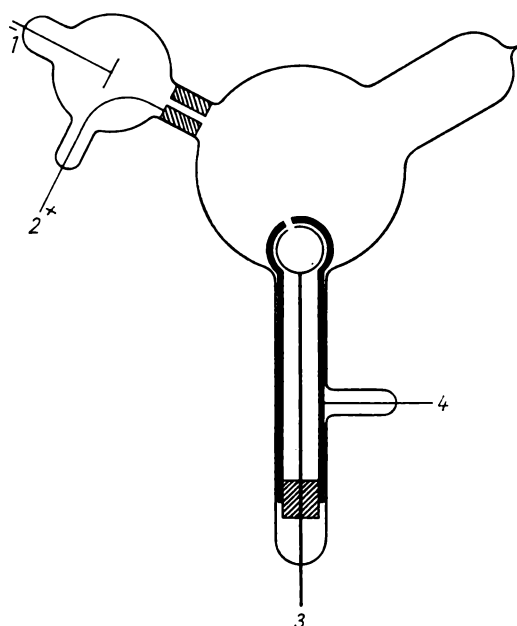
Perrin versah die Anode einer Geißlerschen Röhre mit einer Bohrung, brachte in geringem Abstand davon auf der der Katode abgekehrten Seite ein zweites Blech an und verband es mit einem empfindlichen Elektrometer. Katodenstrahlen, die die Anodenbohrung durchdrangen, mußten, sofern sie elektrische Ladungen mit sich führten, das Elektrometer aufladen.

Perrin erhielt ein unerwartetes Resultat: Manchmal zeigte das Elektrometer eine Ladung an, dann wieder nicht. Mitunter verschwand eine bereits vorhandene Ladung wieder – schnell und ohne erkennbaren Anlaß.

Das konnte zweierlei Gründe haben. Entweder hatte die Ladung des Elektrometers mit Katodenstrahlen nichts zu tun, oder aber die Versuchsergebnisse wurden durch störende Einflüsse von außen gefälscht.

Nach dem, was man über Katodenstrahlen bereits wußte, lag die zweite Annahme näher. *Perrin* bemühte sich daher, äußere Einflüsse abzuschirmen. Die Anode wurde kastenförmig, mit einem Fensterchen in Katodenrichtung, gestaltet; in ihrem Inneren saß, gleichfalls mit einem der Katode zugewandten Fenster, ein zweites Kästchen, sorgfältig gegen die Anode isoliert und mit einem Elektroskop oder Elektrometer verbunden.

Die Abschirmung brachte den erhofften Erfolg. Die Resultate waren nun stabil



Thomsons Variante des Versuchs von Perrin: Die von der Katode 1 ausgehenden, durch die Anode 2 beschleunigten Elektronen erreichen den mit dem Elektrometer 3 verbundenen Leiter nur, wenn sie durch ein Magnetfeld in ihrem Flug beeinflusst werden

4 geerdeter Abschirmkäfig

und nicht mehr anzuzweifeln. Eindeutig zeigten die Nachweisinstrumente negative elektrische Ladung an.

Anhänger der Wellenvorstellung hatten allerdings auch jetzt noch Vorbehalte. Zwar bestritten sie das Auftreten negativer Ladungen im Zusammenhang mit Katodenstrahlen nicht, aber sie bezweifelten, daß diese Ladungen und die die Fluoreszenz hervorrufende Strahlung identisch seien – es war ja zum Beispiel denkbar, daß die Ladungen eine Folgeerscheinung waren, erst am Fluoreszenzfleck durch den Aufprall der Katodenstrahlen »herausgeschlagen« wurden und so schließlich auf das Elektrometer gelangten.

Durch eine Änderung der Versuchsanordnung, auf *Joseph John Thomson* (1856 bis 1946) zurückgehend, konnten diese Einwände entkräftet werden. Die Ladungen wurden diesmal durch einen seitlich angebrachten Ansatz entnommen. Diesen Ansatz aber konnten Katodenstrahlen nur erreichen, wenn sie durch einen der Röhre genäherten Magneten entsprechend abgelenkt wurden. War dies der Fall, konnte negative elektrische Ladung nachgewiesen werden, ohne daß ein Fluoreszenzfleck auftrat. Ohne Magneten hingegen fluoreszierte die der Katode gegenüberliegende Glaswand, während das Elektrometer keine Ladung anzeigte. Offenbar gingen also die Ladungen nicht von der Glaswand aus.

Man konnte eine erste Zwischenbilanz ziehen. Die Katodenstrahlen führten elektrische Ladungen mit sich, die sich bei der Ablenkung im magnetischen oder elektrischen Feld wie winzige elektrisch geladene Teilchen verhielten.

Was für Teilchen waren das? Wie »sahen sie aus«, wie »groß« waren sie, welche Ladung führten sie mit, welche Masse hatten sie? Welche Geschwindigkeit hatten oder erreichten sie?

Um diese Fragen entscheiden zu können, mußte man die spezifische Ladung der Teilchen bestimmen, das Verhältnis zwischen Ladung und Masse der Katodenstrahlteilchen.

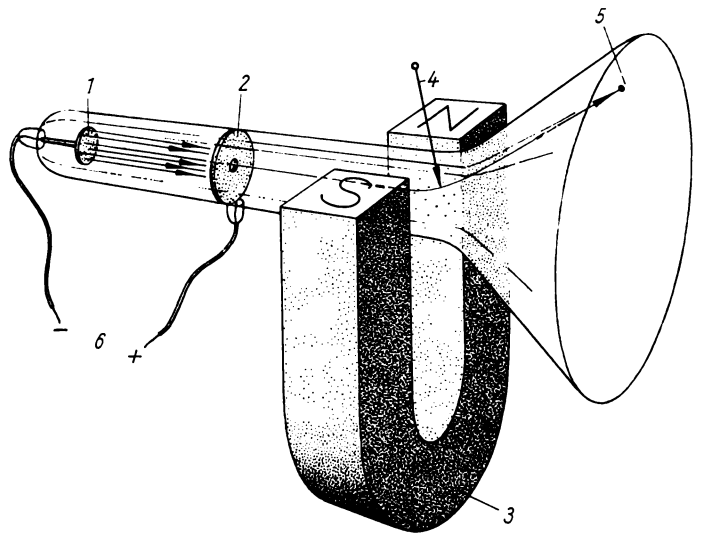
Gegen Ende des 19. Jahrhunderts gelangen diese Messungen. Sie wurden von zahlreichen Physikern – wir nennen stellvertretend für sie *J. J. Thomson*, *Wilhelm Wien* (1864 bis 1928), *Emil Wiechert* (1881 bis 1947) – durchgeführt, beruhten auf Varianten gleicher Überlegungen und brachten im wesentlichen übereinstimmende Resultate.

Eine experimentelle Anordnung ist im Bild »Messung der spezifischen Elektronenladung« skizziert: Die Elektronen verlassen die Katode und bewegen sich, durch elektrische Spannung beschleunigt, zur Anode, die sie mit einer bestimmten Geschwindigkeit erreichen. Ein Teil passiert die Anodenbohrung, fliegt mit nunmehr gleichbleibender Geschwindigkeit weiter und tritt in das Feld eines Magneten ein. Dieses lenkt die Elektronen auf eine Kreisbahn.

Die Versuchsanordnung lieferte gleich zwei Ergebnisse – eines so überraschend wie das andere: Die Elektronen erreichten Geschwindigkeiten von Zehntausenden von Kilometern in der Sekunde, ein Vielfaches von dem, was man je an Teilchen oder Körpern beobachtet hatte. Für die spezifische Teilchenladung, das Verhältnis zwischen Elektronenladung und -masse, erhielt man, in heutigen Einheiten ausgedrückt, $1,8 \cdot 10^8 \text{ As/g}$. Anders ausgedrückt: Ein Strom von 1 A müßte länger als 5 Jahre ununterbrochen fließen, um »1 g Katodenstrahlteilchen« zu transportieren.

Das waren erstaunliche Zahlen – aber sich an solche Zahlen zu gewöhnen, fiel Physikern nicht schwer. Bedeutsamer und interessanter waren andere Seiten des Resultats:

Die spezifische Teilchenladung war unabhängig davon, durch welche Spannung die Katodenstrahlen ausgelöst wurden, unabhängig auch davon, ob sich in der Röhre Luft-, Wasserstoff- oder andere Gasreste befanden.



Messung der spezifischen Elektronenladung (schematisch)

1 Katode; 2 Anode; 3 Magnet; 4 Radius der Ablenkung; 5 abgelenkte Elektronen; 6 Beschleunigungsspannung

Damit war zunächst endgültig klar, daß Katodenstrahlteilchen nicht, wie *Crookes* anfänglich angenommen hatte, Gasreste sein konnten. Der Vergleich mit spezifischen Ladungen, die man für Ionen und bei elektrochemischen Untersuchungen erhalten hatte, führte weiter, obgleich das Ergebnis höchst überraschend war: Das Verhältnis Ladung/Masse des Katodenstrahlteilchens, des Elektrons, war rund 2000mal größer als das des leichtesten Ions, des Wasserstoffions.

Zwei Deutungsmöglichkeiten bestanden: Entweder stimmten Elektronenmasse und Masse des Wasserstoffions überein – dann mußte die Elektronenladung rund 2000mal größer als die des Wasserstoffions sein. Oder aber: Ladung von Elektron und von Wasserstoffion waren gleich, dann blieb für die Elektronenmasse nur der rund 2000ste Teil der Masse des Wasserstoffions.

Die erste Möglichkeit widersprach bereits Bekanntem (zum Beispiel den Untersuchungen *Lenards*), man mußte sich für die zweite entscheiden, so schockierend sie auch beim ersten Hinsehen sein mochte: »Die Masse des Elektrons ist viel geringer als die des leichtesten Atoms.« Diese Feststellung war weit mehr als nur eine »Zahl«; zeigte sie doch, daß die bisherigen Vorstellungen unteilbarer Atome als kleinste Bausteine der Welt zumindest korrekturbedürftig waren.

Allerdings hatte man noch nie die Ladung *eines* Teilchens gemessen, sondern stets nur den Mittelwert großer Teilchenzahlen erhalten. Waren Mittelwert und Ladung des einzelnen Teilchens wirklich identisch?

Gewiß hatten die Ergebnisse elektrochemischer Messungen für die elektrische Elementarladung, die von einem Elektron transportierte Elektrizitätsmenge, immer zu gleichen Resultaten geführt; auch wies die Beobachtung, daß ein Elektronenstrom bei der Ablenkung im magnetischen oder elektrischen Feld nicht auseinanderfächerte, auf für alle Elektronen gleiche Ladungen hin. Sicherheit aber konnte erst ein Experiment geben, bei dem tatsächlich die Ladung einzelner Elektronen gemessen wurde.

Die Öltröpfchenmethode, die der amerikanische Physiker *Robert Andrews Millikan* (1868 bis 1953) zur Bestimmung der elektrischen Elementarladung ausarbeitete, geht im Grunde auf Versuche *Otto von Guericke*s (1602 bis 1686) zurück. Dieser hatte leichte Körperchen dadurch zum Schweben gebracht, daß er einen geriebenen und somit elektrischen Glasstab darüber hielt und so die Anziehungskraft der Erde kompensierte.

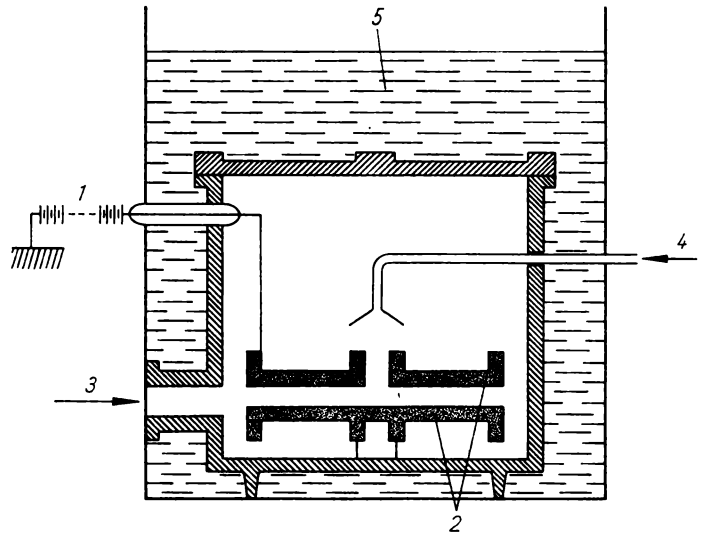
Millikan sagte sich: Je kleiner die schwebenden Teilchen sind, desto weniger elektrische Ladung können sie tragen. Wählen wir sie winzig, mikroskopisch klein, etwa, indem eine Flüssigkeit wie Öl zerstäubt wird, dürfte jedes dieser Schwebeteilchen nur einige wenige, vielleicht sogar nur *eine* elektrische Elementarladung mit sich führen. Auch jedes noch so kleine, geladene Öltröpfchen aber gehorcht den Gesetzen der Mechanik ebenso wie denen der Elektrizitätslehre, also mußte sich durch Anwendung dieser Gesetze seine elektrische Ladung ermitteln lassen.

Unser Bild zeigt nur das Prinzip der Millikanschen Apparatur, alle Hilfs- und Zusatzeinrichtungen sind weggelassen.

Wichtigste Teile sind die beiden Platten, die mit einer einstellbaren Hochspannungsquelle von einigen Kilovolt verbunden sind. Durch eine Bohrung in der oberen Platte bläst ein Zerstäuber Öltröpfchen in den Plattenzwischenraum, die sich beim Passieren der Zerstäuberdüse durch Reibung elektrisch aufladen. Eine

Die Öltröpfchenmethode (weitgehend vereinfacht)

1 Hochspannungsquelle; 2 Platten; 3 Lichtquelle; 4 Zerstäuber; 5 Ölbad



Lichtquelle beleuchtet den Plattenzwischenraum, damit im Beobachtungsmikroskop ein genügend helles Bild entsteht.

Auf jedes Teilchen im Plattenzwischenraum wirken zwei Kräfte: Die Schwerkraft, die es nach unten zieht, und die elektrische Anziehungskraft, die es je nach seiner Ladung zur oberen oder unteren Platte in Bewegung setzt. Sind diese Kräfte einander entgegengesetzt gerichtet und gleich groß, schwebt das Teilchen.

Die Kraft, mit der das Teilchen von der Erde angezogen wird, ergibt sich, wenn man seine Masse kennt. Die durch seine elektrische Ladung verursachte Anziehung errechnet sich aus Plattenspannung, Plattenabstand und Ladung des Teilchens. Im Schwebefall sind beide Kräfte gleich, aus ihrer mathematischen Gleichsetzung ist die Teilchenladung zu errechnen.

Wir wollen nicht näher darauf eingehen, wie schwierig die Ausführung dieses an sich einfachen Gedankens war. Allein die Bestimmung der Tröpfchenmasse konnte nur auf Umwegen erfolgen (über das langsame Herabsinken bei abgeschalteter Spannung zum Beispiel), da sich kein einzelnes Tröpfchen wägen ließ. Auch mußten Temperaturschwankungen ausgeschaltet werden – man setzte die ganze Anordnung in ein Ölbad –, und schließlich störte das durch die Brownsche Bewegung verursachte ständige Zittern der beobachteten Teilchen erheblich. *Millikan* erreichte sein Ziel trotzdem:

Die Teilchen trugen die aus elektrochemischen Versuchen bekannte Elementarladung ($1,602 \cdot 10^{-19}$ As) oder ganzzahlige Vielfache davon. Kleinere Elektrizitätsquanten als die Elementarladung traten nicht auf (sie konnten auch auf anderen Wegen nicht gefunden werden). Am Elektron, dem »Elektrizitätsatom«, war nicht mehr zu zweifeln.

Nachdem sich Elektronen als entscheidend für die Stromleitung in Flüssigkeiten, Gasen und im Vakuum erwiesen hatten, fragte man naturgemäß nach dem Stromfluß durch feste Leiter.

Gesetzmäßigkeiten, die man seit Beginn des 19. Jahrhunderts aufgedeckt hatte, deuteten immer wieder daraufhin, daß ein über längere Zeit fließender Strom

nicht irgendwoher kommt und irgendwohin fließt, sondern stets Teil eines Kreislaufs ist: Er wird, ähnlich wie Wasser von einer Pumpe, in Bewegung gesetzt und gibt auf seinem Weg Energie ab, die ihm dann von der Spannungsquelle wieder zugeführt wird.

Da unwahrscheinlich war, daß sich zum Beispiel Elektronen verwandeln, wenn sie aus einer Geißlerschen Röhre oder einem Elektrolysegefäß in einen Draht übertreten, lag die Annahme nahe, daß auch in Leitern Elektronen für den elektrischen Strom verantwortlich seien.

Wenn es solche Leitungselektronen gab, waren sie, das zeigten zum Beispiel der elektrische Widerstand und seine Temperaturabhängigkeit, offenbar komplizierteren Regeln unterworfen als Elektronen in Geißlerschen Röhren. Die Kenntnisse vom Aufbau des Atoms, an deren Zustandekommen Katodenstrahlen bzw. Elektronen nicht unbeteiligt gewesen waren, ermöglichten in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts, die Hypothese der Leitungselektronen auszubauen. Als es schließlich gelang, auch die Leitungselektronen experimentell nachzuweisen, hatte sich der Kreis geschlossen: Wo immer elektrischer Strom oder elektrische Ladungen auftraten, sei es im Vakuum, in Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern, waren seine »Tröpfchen« Elektronen – die gleichen, die einst als Katodenstrahlen so rätselhaft erschienen waren.



Die Kristalle des Wilhelm Conrad Röntgen

Wir haben unseren Versicherungsausweis vorgewiesen und treten zwischen ein weiß lackiertes Gestell, das ein wenig nach Desinfektionsmitteln riecht. »Tief einatmen bitte . . . Atem anhalten . . . so, danke . . . bitte jetzt umdrehen . . .«

In bestimmten Abständen hören wir diese oder ähnliche Sätze; denn regelmäßig werden wir zur Röntgen-Reihenuntersuchung aufgerufen. Vor allem, wenn Bequemlichkeit uns abhalten will, die wenigen Minuten für die Röntgenaufnahme zu opfern, sollten wir daran denken, daß es nicht zuletzt auch den Reihenuntersuchungen zu verdanken ist, wenn die jahrhundertealte Angst vor Lungenerkrankungen beseitigt und gebannt werden konnte.

Aber auch ohne Reihenuntersuchungen wären die nach einem deutschen Physiker benannten Strahlen jedermann bekannt:

In der medizinischen Diagnostik und in der Therapie, im Arbeitsbereich des Chirurgen und Internisten wirken sie seit Jahrzehnten segensreich.

Für die Kontrolle von Schweißnähten und Gußstücken, für die Produktionsüberwachung in der chemischen und metallurgischen Industrie gelten sie als unentbehrlich.

Dem Forscher sind sie immer wieder ein wertvolles Hilfsmittel. Selbst Kriminalisten und Kunsthistoriker möchten und könnten sie kaum missen.

Nur wenige Fenster des Würzburger Universitätsinstituts sind an jenem Novemberabend des Jahres 1895 noch beleuchtet. Manche Passanten mögen es verwundert zur Kenntnis genommen, vielleicht den Kopf geschüttelt haben: Nicht recht zu begreifen, dieser Arbeitseifer der Herren Wissenschaftler, von deren Tätigkeit man eigentlich gar keine rechte Vorstellung hat.

Niemand, der vorbeigeht, ahnt auch nur, daß in eben dieser Stunde sich hinter den Mauern des Physikalischen Instituts eine Entdeckung anbahnt, von der man wenige Wochen später in aller Welt lesen und sprechen wird.

Vor seinem Arbeitstisch steht derjenige, von dessen erleuchtetem Arbeitszimmer hier die Rede ist: *Wilhelm Conrad Röntgen* (1845 bis 1923), fünfzigjährig, hochgewachsen, die Strenge des Gesichts durch einen dichten Bart noch unterstrichen, seit 1888 Nachfolger des bekannten Physikers *Friedrich Kohlrausch* (1840 bis 1910) an der Würzburger Universität.

Vor ihm, neben ihm liegen Notizhefte, Zeitschriftenbände, aufgeschlagene oder mit Lesezeichen versehene Bücher. *Röntgen* schafft sich Platz, um Versuche vorzubereiten. Einige Kristalle auf einem Nebentisch bleiben unbeachtet.

Nutzen wir diese Vorbereitungszeit, um einen Blick auf *Röntgens* bisherigen Lebensweg zu werfen.

Röntgen hatte die Schule in Holland besucht, wohin seine Eltern – drei Jahre nach seiner Geburt – übersiedelt waren. Er galt als ausgezeichnete Schüler; doch ein im Grunde harmloser Jungenstreich, an dem er selbst wohl nicht einmal unmittelbar beteiligt war, hatte zur Folge, daß man ihm das Reifezeugnis, Voraussetzung des ersehnten Hochschulstudiums, versagte.

Doch *Röntgen* wollte studieren – wenn nicht in Holland oder in Deutschland, dann eben am Schweizer Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich, wo man in Ausnahmefällen auf das Reifezeugnis verzichtete.

Röntgen ist eine solche Ausnahme: ein künftiger Student mit hervorragenden Kenntnissen, wenn auch ohne Brief und Siegel. Er darf, sogar ohne Aufnahmeprüfung, studieren.

Drei Jahre später nimmt er sein Diplom als Maschinenbauingenieur entgegen, im Jahr darauf promoviert er an der Philosophischen Fakultät der Züricher Universität. Leicht wäre es, mit diesen beiden Diplomen in der Industrie, vielleicht auch im Staatsdienst, unterzukommen. *Röntgen* aber bleibt als Assistent des Physikers *August Kundt* (1829 bis 1894) in Zürich.

Diese Tätigkeit stellt die Weichen für *Röntgens* weiteren Lebensweg: Der Maschinenbauingenieur entdeckt seine Liebe für die Physik. Er wendet sich ihr zu, unwiderruflich und mit allen Konsequenzen. Diese aber heißen zunächst: arbeiten, weiter studieren, das mathematische Rüstzeug erwerben und die Experimentierkunst handhaben lernen. *Röntgen* schreckt davor nicht zurück. Innerhalb kurzer Zeit entwickelte er sich zu einem Physiker, der nicht nur theoretische Zusammenhänge zu erfassen und auszuwerten vermag, sondern vor allem ein geschickter Experimentator ist und mit einem Minimum an apparativem Aufwand auszukommen versteht.

Für uns, die wir *Röntgens* größte Entdeckung kennenlernen wollen, sind die Ereignisse der folgenden Jahre nur Zwischenstationen. Wir finden ihn für kurze Zeit bereits einmal in Würzburg, dann unter anderem in Straßburg, wo er seine Habilitationsschrift vorlegt, später für nahezu zehn Jahre an der Gießener Universität als Inhaber des Lehrstuhls für Physik.

Auch die wissenschaftlichen Arbeiten *Röntgens* aus jener Zeit können wir nicht ausführlich würdigen. Sie sind zahlreich, befassen sich mit vielen Teilgebieten der Physik und haben den Namen ihres Urhebers in der Fachwelt bereits bekannt gemacht.

Begeben wir uns nun wieder nach Würzburg. Dort setzt *Röntgen* seine wissenschaftlichen Arbeiten und Veröffentlichungen fort, soweit ihm Vorlesungsbetrieb und zahlreiche andere Verpflichtungen (1894 wählte man ihn zum Rektor der Universität) Zeit dazu lassen. Er studiert die Arbeiten der Fachkollegen aus dem In- und Ausland, prüft die Resultate nach, ergänzt sie durch eigene Experimente, getreu seiner These, daß das Experiment allein höchste Instanz für die Entscheidung der Frage ist, ob eine Hypothese zu verwerfen sei oder nicht.

Unter den Themen, die damals von den Physikern bearbeitet wurden, nahmen die Katodenstrahlen, ihre Eigenschaften und ihre Natur einen besonders wichtigen Platz ein. Auch *Röntgen* hatte die Versuche von *Goldstein*, *Crookes*, *Lenard*,

Perrin und anderen studiert und durchdacht. Mehr noch: er wiederholte sie, um selbst tiefer in das Gebiet einzudringen, verglich, maß, rechnete.

War wirklich alles entdeckt, was an Katodenstrahlen zu entdecken war? Suchte *Röntgen* nach Erscheinungen und Zusammenhängen, die man bisher nicht beobachtet oder nicht beachtet hatte? Wollte er ergründen, warum unbelichtete Fotoplatten mitunter nach dem Entwickeln Schatten zeigten, wenn sie lichtdicht verpackt in der Nähe einer Katodenstrahlen erzeugenden Röhre gelegen hatten? Vermutete er gar unsichtbares Licht, das von der Entladungsröhre ausging?

Wir wissen nicht, können nicht einmal vermuten, welchen Gedanken *Röntgen* an jenem Abend nachging. *Röntgen* war sehr zurückhaltend, vielleicht zu zurückhaltend in seinen Äußerungen: selten nur zog er, wenn er experimentierte und der Lösung eines Problems auf der Spur war, Mitarbeiter hinzu. Heute, da kein Wissenschaftler mehr als »Einzelkämpfer« arbeiten kann, erscheint uns das schwer begreiflich; damals stellte *Röntgen* durchaus keinen Einzelfall dar.

An jenem 8. November jedenfalls experimentiert *Wilhelm Conrad Röntgen* wieder mit Katodenstrahlen. Das dazu benötigte Instrumentarium ist einfach und selbst in sparsam eingerichteten Laboratorien verfügbar. Ein Funkeninduktor, durch *Heinrich Daniel Ruhmkorff* (1803 bis 1877) zur zuverlässigen Hochspannungsquelle entwickelt, und eine Entladungsröhre Hittorfscher, Crookescher oder Lenardscher Bauart samt der zum Evakuieren nötigen Pumpe bilden die Grundausstattung. In einer »Kleinigkeit« allerdings unterscheidet sich die Entladungsröhre von ihren Vorgängern: Der Gasdruck in ihrem Inneren ist diesen gegenüber weiter vermindert, der bekannten Tatsache entsprechend, daß Katodenstrahlen und ihre Wirkungen mit sinkendem Druck deutlicher werden. Diese Versuchseinrichtung ergänzen bei Bedarf Elektrometer, Magnete zum Ablenken der Strahlen oder auch ein mit einer fluoreszierenden Substanz präparierter Kartonschirm, ein Leuchtschirm, wie man ihn zum Nachweis unsichtbarer Strahlung benutzt.

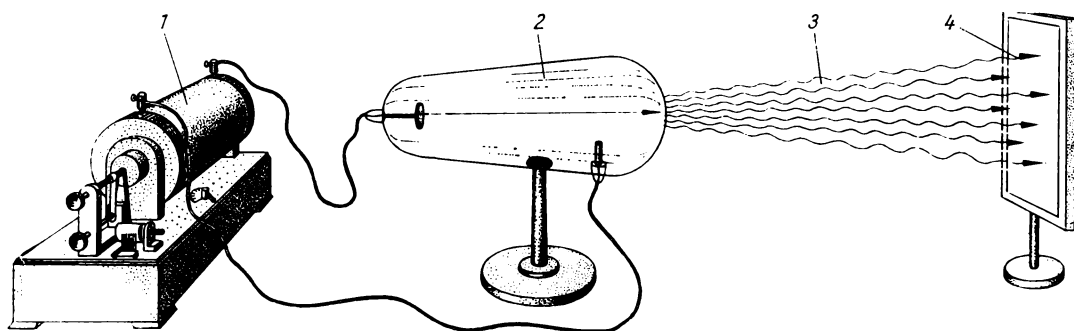
Um nicht durch Leuchterscheinungen gestört zu werden, hüllt *Röntgen* die Entladungsröhre in schwarzes, lichtundurchlässiges Papier.

Ist die Hülle wirklich lichtdicht? Um es nachzuprüfen, löscht *Röntgen* das Licht und schaltet den Induktor ein. Das Schnarren des Unterbrechers zeigt, daß die Röhre in Betrieb ist.

Kein Lichtschimmer dringt aus der Umhüllung. Doch dann wendet *Röntgen* überrascht den Kopf: Die Kristalle auf dem Nebentisch fluoreszieren, nicht sehr hell zwar, aber doch deutlich sichtbar. *Röntgen* schaltet den Induktor ab. Das Leuchten verschwindet, kehrt jedoch beim Einschalten sofort wieder.

Wo liegt die Ursache – im Induktor, in der Entladungsröhre? Nichts einfacher, als das festzustellen: Wenn der Induktor ohne angeschlossene Entladungsröhre arbeitet, fluoreszieren die Kristalle nicht. Also muß die Entladungsröhre Urheber des Fluoreszierens sein. Was aber konnte die Kristalle zum Leuchten anregen?

Ultraviolette Strahlen schieden aus – sie hätten das Papier nicht durchdrungen. Aber auch Katodenstrahlen kamen als Ursache nicht in Betracht; sie wurden bereits durch dünnste Stoffschichten zurückgehalten, und es hatte spezieller Kunstgriffe bedurft, sie überhaupt außerhalb einer Entladungsröhre – und sei es nur auf Entfernungen von wenigen Zentimetern – nachweisen zu können.



Röntgens einfachste Versuchsanordnung

1 Funkeninduktor; 2 Katodenstrahlen;
3 X-Strahlen; 4 Fluoreszenz-
schirm

Röntgen holt den präparierten Schirm herbei. Noch in 2 m Entfernung von der Entladungsröhre leuchtet er grünlich auf, sogar dann, wenn man ihn so dreht, daß die Leuchtschicht der Röhre abgewandt ist. Offensichtlich durchdringen die Strahlen den Schirm ebenso leicht wie die Papierumhüllung.

Wie durchdringend ist überhaupt das von der Röhre ausgehende unsichtbare Licht? *Röntgen* hält zwischen Entladungsröhre und Leuchtschirm, was sich in greifbarer Nähe befindet: ein Stück Holz, ein Aluminiumplättchen. Sie werden ebenfalls von den Strahlen durchdrungen, setzen ihnen aber wohl einen gewissen Widerstand entgegen; denn ihre Schatten zeichnen sich schwach auf dem Bildschirm ab.

Ein Kästchen mit einem Satz Wägestücke steht in Reichweite. *Röntgen* hält es zwischen Entladungsröhre und Schirm. Deutlich erscheinen die Silhouetten der eingeschlossenen Wägestücke auf dem Leuchtschirm.

Unwillkürlich hält *Röntgen* die Hand vor den fluoreszierenden Karton, reißt sie überrascht zurück. Der Schirm gab das Knochengerüst wieder, schemenhaft umrahmt von den Umrissen der Hand. *Röntgen* reibt sich die Augen, wiederholt zögernd den Versuch. Das Bild erscheint von neuem.

Völlig neuartige, auch in nur entfernt ähnlicher Form nie beobachtete Eigenschaften müssen es sein, die das »unsichtbare Licht«, die »unbekannte Strahlung« oder was auch immer von der Röhre ausgeht, auszeichnen. *Röntgen* wäre nicht – nun eben nicht *Wilhelm Conrad Röntgen* gewesen, aufgeschlossen gegenüber jedem Fortschritt seiner Wissenschaft, leidenschaftlicher, selbstkritischer und geschickter Experimentator zugleich, wenn er nicht sofort beschlossen hätte, diesen Erscheinungen auf den Grund zu gehen.

In den folgenden Wochen haben nur wenige Gelegenheit, einige spärliche Worte mit *Röntgen* zu wechseln. Selbst seine Frau bekommt ihn tagelang nicht zu sehen. *Röntgen* verläßt seine Arbeitsräume kaum, läßt sich die Mahlzeiten ins Laboratorium bringen, schlingt zwischen zwei Versuchen einige Bissen herunter, schläft kurze Nachtstunden auf einem eigens hergerichteten provisorischen Bett.

Kollegen und Assistenten zucken die Achseln. Zwar sind sie gewohnt, daß ihr Chef am liebsten allein arbeitet, daß er über seine Arbeiten und ihre Ergebnisse erst spricht, wenn er alles gründlich durchdacht hat, alle Fragen beantworten kann, aber diesmal? Kein Sterbenswörtchen darüber, woran *Röntgen* experimentiert, ganz vereinzelt nur Andeutungen, er sei einer interessanten Sache auf der Spur – mehr nicht.

Es sollte sich später zeigen, daß *Röntgen* diese Wortkargheit erheblich geschadet hat. Sie führte dazu, daß von Neidern und Mißgünstigen törichte oder böswillige Gerüchte über die Entdeckung *Röntgens* verbreitet werden. Nicht er, so heißt es, sondern einer seiner Mitarbeiter – die Liste reicht vom Laboratoriumsdieners bis zum Professor-Kollegen – habe das unsichtbare Licht entdeckt und *Röntgen* darauf aufmerksam gemacht. Am harmlosesten war noch die Version, *Röntgen* sei durch einen Zufall auf seine Entdeckung gebracht worden.

Verweilen wir für einige Zeilen bei diesem Zufall. Die Geräte, die *Röntgen* benutzte, waren damals weit verbreitet; denn überall erzeugte und untersuchte man Katodenstrahlen, und überall, wo energiereiche Katodenstrahlen ein Hindernis treffen, entsteht *Röntgens* unsichtbares Licht. Wahrscheinlich hatte man seine Wirkung, zum Beispiel die unbeabsichtigte Belichtung von Fotoplatten, bereits mehrfach erfahren müssen, ohne weiter darauf zu achten. Aber – und hier sei *J. D. Bernal* zitiert:

»Die Schwierigkeit in der Wissenschaft liegt oftmals nicht so sehr darin, etwas zu entdecken, sondern zu erkennen, daß man eine Entdeckung gemacht hat.«

Gerade das aber war die entscheidende Leistung *Röntgens*. Sicherlich war Zufall, daß er gerade an diesem Abend experimentierte und die Kristalle aufleuchten sah – aber nicht zufällig ging *Röntgen*, der sich seit längerer Zeit mit Katodenstrahlen beschäftigt hatte, seiner Beobachtung sofort nach. Selbst wenn *Röntgen* an jenem Abend nicht allein gewesen wäre und ihn vielleicht ein Mitarbeiter auf das Fluoreszieren aufmerksam gemacht hätte, würde das sein Verdienst nicht schmälern.

»Habe ich etwas Neues entdeckt?« Das war die Frage, die *Röntgen* sich stellte. Wenn nicht, müßte sich für die Fluoreszenz und für das Durchdringungsvermögen eine auf Bekanntes zurückführende Erklärung finden lassen. Wenn ja, galt es, das Neue gründlichst und nach allen Seiten hin zu untersuchen. In jedem Falle war ein umfangreiches Arbeitsprogramm zu absolvieren. *Röntgen* schreckte nicht davor zurück.

Fürs erste nimmt er sich nochmals die Entladungsröhre vor, untersucht genauestens, ob es nicht eine winzige undichte Stelle in der schützenden Hülle gibt, und schaltet alle nur denkbaren Fehlerquellen aus.

Immer wieder prüft und untersucht er, ob vielleicht doch Katodenstrahlen oder ultraviolettes Licht Ursache der Erscheinungen sein können. Aber weder läßt sich die für Katodenstrahlen typische Ablenkbarkeit durch magnetische oder elektrische Felder nachweisen, noch gelingt es ihm, die sich offensichtlich geradlinig ausbreitenden Strahlen durch ein Prisma zu brechen.

Schließlich besteht für *Röntgen* kein Zweifel mehr: Von der Entladungsröhre geht nicht »unsichtbares Licht« schlechthin aus, sondern eine bisher völlig unbekannte, neue Strahlenart.

X-Strahlen nennt *Röntgen* sie, in Anlehnung an die Unbekannte mathematischer Gleichungen. Und ebenso, wie man die Unbekannte »x« durch eine logische Aneinanderreihung von Rechenschritten bestimmt, ermittelt *Röntgen* in einer Kette von Experimenten die Eigenschaften »seiner« Strahlen.

Gleich zu Beginn gilt es, einer Schwierigkeit Herr zu werden: Das menschliche Auge ist als Beobachtungsinstrument nicht unbestechlich genug. Es muß sich erst über längere Zeit den bei den meisten Versuchen schwachen Lichteindrücken anpassen, ermüdet rasch und ist subjektiven, störenden Einflüssen unterworfen.

Röntgen hält daher, wo immer das möglich ist, seine Beobachtungsergebnisse mit Hilfe der Fotoplatte fest. Auch fotografiert er das Innere verschiedener Versuchsobjekte: das Kästchen mit dem Satz Wägestücke, einen Nagel in einem Holzkloben, die Hand seiner Frau mit den Handknochen und dem scheinbar frei darüber schwebenden Ehering, später den Lauf einer Jagdflinte mit deutlich sichtbaren Herstellungsfehlern.

Alle diese Aufnahmen, in denen *Röntgen* sofort die sich eröffnenden Möglichkeiten für Medizin und Technik erkennt, werden mit denkbar einfachsten Mitteln gemacht, mit Entladungsröhren, die nur Strahlen geringer Intensität erzeugen, mit Fotoplatten, deren geringe Empfindlichkeit viertelstundenlange Belichtungszeiten erfordert. Trotzdem bestechen die ersten Röntgenaufnahmen noch heute durch ihre Qualität; sie sind nicht nur in historischen Veröffentlichungen, sondern auch in Fachbüchern zu finden.

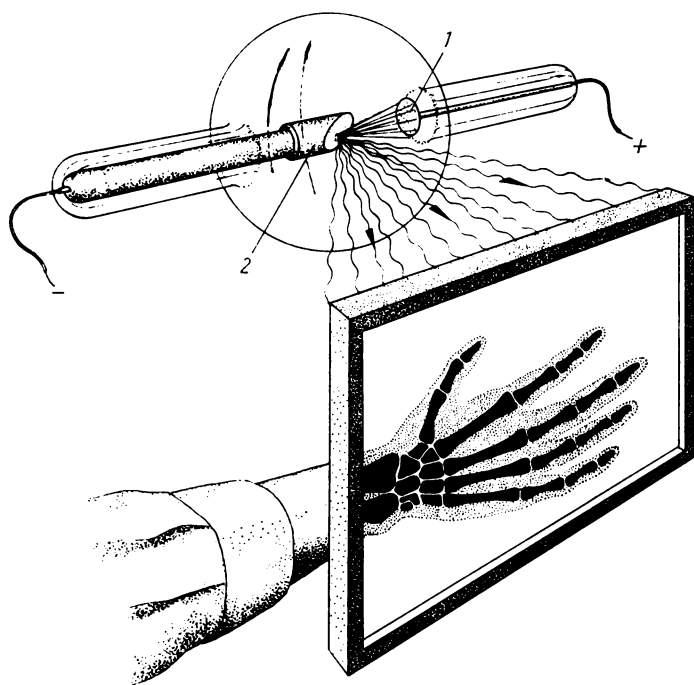
Röntgen stellt fest, daß die Intensität von X-Strahlen nach dem gleichen Entfernungsgesetz abnimmt, wie es auch für Licht bekannt ist: Verdoppelt sich die Entfernung, sinkt die Intensität auf ein Viertel, bei Verdreifachung der Entfernung auf ein Neuntel usw. Er beobachtet, daß manche Metalle leichter, andere schwerer von den Strahlen durchdrungen werden, daß besonders Bleischichten dazu dienen können, die Strahlen abzuschirmen. *Röntgen* nutzt solche Bleiabschirmungen hinfert aus, um die allseitige Strahlenausbreitung zu unterbinden und um sein Fotomaterial vor ungewollter Belichtung zu bewahren, noch nicht wissend, daß er sich damit vor den physiologischen Wirkungen der X-Strahlen wenigstens teilweise schützt.

Er erkennt, daß ein geladenes Elektroskop sich im Strahlenbereich rasch entlädt, und schließt daraus, daß die Strahlen der Luft eine gewisse elektrische Leitfähigkeit verleihen. Auch bemerkt er, daß X-Strahlen nicht nur von der fluoreszierenden Stelle der Glaswand, sondern ebenso von einem durch Katodenstrahlen getroffenen Blech ausgehen. (Später benutzt er diese Erscheinung, um die Metallanode der Röhre selbst als Strahlenquelle anzuwenden, wie es heute allgemein üblich ist.)

Was die Natur der Röntgenstrahlen anbelangt, so vermutet *Röntgen* in ihnen elektromagnetische Längswellen, doch gelingt es ihm nicht, diese Vermutung, die sich übrigens später als falsch herausstellte, experimentell zu belegen.

Nach sieben Wochen angestrengter Arbeit lüftet *Röntgen* den Schleier seines Einsiedlerdaseins mit einer nur zehn Seiten umfassenden Veröffentlichung. Er überreicht sie in der Weihnachtswoche 1895 dem Sekretär der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft an der Universität Würzburg. Sie trägt den bescheidenen Titel »Über eine neue Art von Strahlen«.

Bereits in den ersten Januartagen konnte *Röntgen* Freunden und Kollegen seine Abhandlung als Sonderdruck zuschicken, dem er auch Lichtbilder beifügte. Die



Eine der ersten Skizzen einer Röntgenröhre, deren Anode zugleich Ausgangspunkt der Strahlung ist
1 Katode; 2 Anode

Wirkung war von *Röntgen* weder vorausgesehen noch gar erwartet worden; im Gegenteil, sie bestürzte ihn. Überall wurden seine Versuche, die er bis in alle Einzelheiten beschrieben hatte, wiederholt. Eine Flut von Briefen, Anfragen, Glückwünschen, Kritiken hinderte ihn, wie er sich mehrfach beklagte, in seiner Arbeit zügig fortzufahren.

Besonders in der Tagespresse fand die Entdeckung breitesten Widerhall, wenn auch oft mit verschobenen Proportionen. Die von *Röntgen* genannte Möglichkeit, Fotoaufnahmen »aus dem Inneren geschlossener Räume« zu erhalten, wurde gründlich mißverstanden, verdrängte alle anderen Eigenschaften der X-Strahlen, erregte die Gemüter und trieb bizarre Blüten, von »strahlensicherer Unterwäsche« bis zu Gedichten und Theaterstücken über die X-Strahlen . . .

Es dauerte auch nicht lange – und dies sollte sich jahrelang in gewissen Abständen wiederholen –, bis weitere neue Strahlen entdeckt wurden, wobei sich allerdings die vermeintliche Entdeckung meistens als Trugschluß, mitunter sogar als Betrug herausstellte.

Röntgen war dies alles zutiefst zuwider, ebenso wie der Vortrag, zu dem er bereits am 12. Januar zu Wilhelm II. befohlen wurde. Für ihn zählte vor allem »die Freude über das Gelingen einer Arbeit und den gemachten Fortschritt . . .«

Am 23. Januar 1896 berichtete er vor der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft über seine Arbeit, die sich, wie er betont, noch im Anfangsstadium befinde. Die Experimente, mit denen er seinen Vortrag veranschaulicht, strafen

seine Bescheidenheit Lügen. Begeistert stimmen die Zuhörer zu, als der Anatom *Kölliker* vorschlägt, von nun an von Röntgenschen Strahlen zu sprechen. *Röntgen* selbst benutzte auch weiterhin die Bezeichnung X-Strahlen.

Röntgen setzte seine Arbeiten fort, veröffentlichte eine »2. Mitteilung«, dann »Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen«. Aber er arbeitet nun nicht mehr als einziger auf diesem Gebiet. Zahllose Forscher untersuchen die Röntgenstrahlen ebenfalls – doch auf Jahre hinaus finden sie nichts grundsätzlich Neues; zu sorgfältig war der Würzburger Professor, der 1900 die Leitung des Münchener Physikalischen Instituts übernahm, vorgegangen.

Immerhin boten die zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten der Strahlen ein weites Betätigungsfeld. Bald standen leistungsfähigere Röhren – mit Metallanode, dann auch mit einer Glühkatode als Katodenstrahlquelle – zur Verfügung. Die Röntgenaufnahmen konnten dadurch verbessert werden, daß man hinter den Fotoplatten eine die Belichtungszeiten herabsetzende fluoreszierende Folie anbrachte; spezielle Fotomaterialien wurden entwickelt.

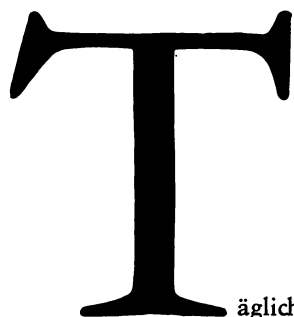
Sehr früh setzte die Anwendung der Röntgenstrahlen in der Medizin ein, vor allem für Diagnosezwecke. Auch die Werkstoffachleute erkannten den Nutzen der Röntgenstrahlen bald. Weitere Berufsgruppen folgten.

Bereits im Jahr nach der Entdeckung zeigten sich jedoch auch unvermutete, erschreckende Wirkungen: Physiker und Mediziner, die viel mit Röntgenstrahlen arbeiteten, erlitten schwer heilende Verbrennungen, ein Assistent *Edisons* starb daran. Schutzmaßnahmen gegen die physiologischen Wirkungen der Strahlen wie das von *Röntgen* bereits angegebene Bleiblech wurden eingeführt; andererseits suchte man gerade die physiologische Wirkung zum Beispiel zur Bekämpfung von Geschwulstkrankheiten zu nutzen.

Die Röntgentechnik konnte sich ungehindert entwickeln, denn *Röntgen* hatte es trotz verlockender Angebote profitgieriger Firmen immer wieder abgelehnt, teilweise schroff zurückgewiesen, durch Patente oder Lizenzen irgendeinen finanziellen Vorteil aus seiner Entdeckung zu ziehen.

1901 erhielt *Röntgen* als erster Physiker den Nobelpreis. Doch auf den von einem Nobelpreisträger erwünschten Vortrag warteten seine Bewunderer vergebens. Über eigene Erfolge zu sprechen, lag *Röntgen* nicht. Auch in seinen Münchener Jahren trat er – geliebt, von manchen aber auch gefürchtet wegen seiner Strenge, seiner Genauigkeit und der hohen Forderungen, die er sich und anderen stellte – nur wenig an die Öffentlichkeit. Die Zahl seiner Publikationen blieb gering. (Das wurde, ebenso wie das Umgehen des Nobelvortrages, von manchen als »schlechtes Gewissen« ausgelegt.)

Neidlos erkannte er die Leistung der Kollegen *Walter Friedrich* (1883 bis 1968) und *Paul Knipping* (1883 bis 1935) an, denen es gelang, die von *Röntgen* so lange vergebens gesuchte Natur der Röntgenstrahlen aufzudecken und nachzuweisen, und die damit zeigten, daß die neue Art von Strahlen, 17 Jahre vorher entdeckt, sich lückenlos in das physikalische Weltbild einfügte.



Felder, Funken, Wellen

täglich stellen wir den Rundfunk- und den Fernsehempfänger an, nehmen Tausende von Schiffen drahtlos Verbindung mit Partnern an Land oder untereinander auf, werden Flugzeuge durch Funkwellen sicher geleitet, gleich, ob sie nachts, im Nebel, in Wolken unterwegs sind, empfangen Taxis, Lastzüge, Rettungsfahrzeuge, Brigaden auf Baustellen, in der Landwirtschaft, in Großbetrieben über Funkwellen Anweisungen für ihren Einsatz.

Millionen, Milliarden Jahre oft sind Signale, getragen von elektromagnetischen Wellen, unterwegs, ehe sie von Astronomen aufgefangen und ausgewertet werden. Sekunden, Minuten, Stunden brauchen die Funksignale, mit denen die Menschheit ihre Kundschafter in den Weltraum lenkt und von dort berichten läßt – heute vom Mond, vom Mars, von der Venus – morgen aus Räumen jenseits der Grenzen unseres Planetensystems.

Als Funkwellen oder als Radiowellen bezeichnen wir jenen Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums, dem wir dies alles verdanken. Vor weniger als 100 Jahren wußte man noch nicht einmal, daß es diese Wellen gab . . .

»Die Behauptung, die ich vertreten möchte, sagt geradezu aus: Das Licht ist eine elektrische Erscheinung, das Licht an sich, alles Licht, das Licht der Sonne, das der Kerze, das eines Glühwurms. Nehmt aus der Welt die Elektrizität, und das Licht verschwindet. . . . Dies ist meine Behauptung. Sie ist nicht von heute und gestern, sie hat schon eine längere Geschichte hinter sich. Ihre Geschichte gibt ihre Begründung.

Eigene Versuche, welche sich auf diesen Gegenstand beziehen, bilden nur ein Glied in einer langen Kette. Und von dieser Kette, nicht allein von dem einzelnen Gliede, möchte ich erzählen.«

Der Physiker, der 1889 auf der 82. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte seinen Vortrag »Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität« mit diesen Worten einleitete, war erst 32 Jahre alt. Seinen Namen, *Heinrich Hertz*, kennt heute die ganze Welt. Wir finden ihn, abgekürzt, auf den Skalen aller Funkempfänger, zahlreicher wissenschaftlicher Apparaturen, in jedem Physikbuch; denn die Arbeiten und Experimente, denen er sich widmete, sind unter anderem das Fundament, auf dem die drahtlose Nachrichtentechnik ruht.

Heinrich Hertz, 1857 als Sohn eines Rechtsanwalts in Hamburg geboren, war durchaus kein »physikalisches Wunderkind«. Zwar durchlief er, wie vor und nach ihm aber Tausende Jugendliche, eine »Phase der naturwissenschaftlichen Experimente«, doch waren seine Interessen und Leistungen auf dem Gebiet der Sprachen

ebenso überzeugend wie auf dem der Naturwissenschaften (sogar mit Arabisch befaßte er sich erfolgreich); darüber hinaus zeigte er – in freien Stunden bei einem Drechsler tätig – eine solche handwerkliche Geschicklichkeit, daß sein Meister, als er von der Berufung seines einstigen jungen Mitarbeiters zum Professor hörte, ausgerufen haben soll: »Wie schade – was wäre das für ein Drechsler geworden . . .«

Nun, Drechsler wurde *Hertz* nicht, wohl aber wandte er sich zunächst der Technik zu und studierte mit dem Ziel, Bauingenieur oder Architekt zu werden. Doch sein Studium in Dresden, später in München befriedigte ihn nicht. Immer stärker zogen ihn die naturwissenschaftlichen Disziplinen und eine Tätigkeit in ihrem Bereich an.

Er wechselte deshalb von der Technischen Hochschule zur Universität über und ging 1878 nach Berlin, wo die berühmten Physiker *Kirchhoff* und *Helmholtz* zu seinen Lehrern zählten. Besonders die ständige Anleitung und Förderung, die *Hertz* durch *Helmholtz* erfuhr, wurde bestimmend dafür, daß er »sein« Thema fand, dem er bis zu seinem Tode – er starb 1894, nur 37 Jahre alt, an einer heimtückischen, damals unheilbaren Krankheit – treu blieb, ohne indessen die Forschungsarbeit und Lehrtätigkeit auf anderen Gebieten zu vernachlässigen. Dieses Thema lautete, kurz ausgedrückt: Experimenteller Nachweis der von *Maxwell* aufgestellten Theorie des elektromagnetischen Feldes, eine Aufgabe, die in jenen Jahren nicht nur *Hertz*, sondern viele Forscher beschäftigte.

Maxwell hatte – vor allem in den nach ihm benannten Gleichungen – eine umfassende Theorie der magnetischen und elektrischen Erscheinungen ausgearbeitet. Er knüpfte dabei vor allem an die Vorstellungen seines großen Vorgängers und Landsmannes *Michael Faraday* an.

Im Gegensatz zur verbreiteten Ansicht, nach der elektrische und magnetische Kräfte zwischen den beteiligten Körpern unmittelbar und ohne Beteiligung des dazwischenliegenden Raumes als »Fernkräfte« wirkten, hatte *Faraday* dem dazwischenliegenden Raum eine entscheidende Rolle zugesprochen, den Begriff des elektrischen und des magnetischen Feldes entwickelt und durch Feldlinien veranschaulicht. In einem Brief vom 12. 3. 1832 hatte er sogar seine Überzeugung ausgedrückt, daß die Ausbreitung elektrischer und magnetischer Kräfte »ein Schwingungsvorgang sei, der sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreite«.

Faraday hatte es im wesentlichen mit der qualitativen Fassung seiner Gedanken bewenden lassen und diese durch Experimente belegt. *Maxwell* hingegen arbeitete die Feldvorstellung mathematisch durch und veröffentlichte die Resultate vor allem in zwei Arbeiten, deren umfassendere 1862 in mehreren Folgen einer wissenschaftlichen Zeitschrift erschien.

Aus seinen Untersuchungen ergaben sich überraschende Folgerungen: Einmal wurde durch sie die seit langem gesuchte Beziehung zwischen Licht und Elektrizität hergestellt, indem sich das, was wir als »Licht« empfinden, als elektromagnetischer Vorgang herausstellte. Zum anderen war aus *Maxwells* Hypothese abzuleiten, daß Lichtwellen nur einen Ausschnitt aus einem viel breiteren elektromagnetischen Spektrum darstellten, daß es zum Beispiel auch elektromagnetische Wellen geben mußte, deren Wellenlänge weit größer war als die des Lichts, eine Hypothese, die von den meisten Naturwissenschaftlern recht skeptisch betrachtet wurde.

130 *Helmholtz* kannte diese Problematik und machte sie zum Gegenstand einer Preis-

aufgabe der Berliner Akademie der Wissenschaften. *Heinrich Hertz* interessierte sich zwar für diese Aufgabe, bearbeitete sie aber zunächst nicht. Er sah noch keine Möglichkeit, die, wie er erkannte, für die Versuche notwendigen überaus schnellen periodischen elektrischen Änderungen (viele Millionen in der Sekunde) zu gewinnen.

Im Winter 1880 promovierte *Hertz* mit einer Arbeit aus dem Gebiet der elektromagnetischen Erscheinungen, später finden wir ihn als Hochschullehrer in Kiel und dann in Karlsruhe. Hier machte er seine bahnbrechenden Entdeckungen. Ihr Anfang liegt im Herbst des Jahres 1886.

Ausgangspunkt war wieder ein »Zufall« (vgl. S. 67). *Heinrich Hertz* bemerkte, daß bei kräftigen elektrischen Entladungen an einer in der Nähe befindlichen Spule Fünkchen übersprangen. Er sah als ihre Ursache Resonanzerscheinungen an, hervorgerufen durch sich ausbreitende elektromagnetische Schwingungen, und kam auf die vor sieben Jahren beiseite gelegte Preisaufgabe zurück. Ihren Aufgabenkreis allerdings erweiterte er bedeutend.

»Es muß«, so etwa hatte *Maxwell* behauptet, »elektromagnetische, transversale Wellen geben, ihrem Wesen nach dem Licht gleich, das heißt auch mit den entscheidenden Eigenschaften des Lichts, aber viel größerer Wellenlänge.«

Es galt, die Existenz der elektromagnetischen Wellen und ihre Wesensgleichheit mit dem Licht nachzuweisen; denn nach *Hertz* glich die Maxwellsche Theorie »einem Gewölbe, das einen tiefen Abgrund voll des Unbekannten überspannte. Alles, was man lange Zeit zur Kräftigung dieses Gewölbes zu tun vermochte, bestand darin, daß man die beiden Widerlager verstärkte. Um indes auf dem Gewölbe als sicherer Grundlage weiter in die Höhe zu bauen, waren besondere Hauptpfeiler notwendig, welche, vom festen Boden aus aufgemauert, die Mitte des Gewölbes faßten. Einem solchen Pfeiler würde der Nachweis zu vergleichen sein, daß wir aus dem Lichte unmittelbar elektrische und magnetische Wirkungen erhalten können. Ein anderer Pfeiler wäre der Nachweis, daß es Wellen elektrischer und magnetischer Kraft gibt, die sich nach Art der Lichtwellen ausbreiten können.«

Der Errichtung dieses zweiten Pfeilers wandte sich *Hertz* zu. Diesmal kapitulierte er nicht mehr vor der »alten« Schwierigkeit, schnellste, periodische elektrische Änderungen, »elektrische Schwingungen« zu erzeugen. *Hertz* griff vielmehr auf Beobachtungen zurück, die seit mehr als 20 Jahren bekannt waren. Damals hatte der deutsche Physiker *Wilhelm Feddersen* (1832 bis 1918) versucht, die Zeitdauer der bei der Entladung einer Leidener Flasche auftretenden Funken zu messen. Er beobachtete dazu das Funkenbild in einem rasch rotierenden Spiegel, benutzte also, wie wir heute sagen würden, ein Oszilloskop. Es stellte sich heraus, daß die Funkenentladung aus zahlreichen einander periodisch folgenden Einzelentladungen zusammengesetzt war, deren jede etwa den millionsten Teil einer Sekunde beanspruchte.

Selbst diese sehr kurze Zeitspanne war jedoch für *Hertz'* Versuche noch viel zu lang. »Während« – so *Hertz* – »eine solche Schwingung verlief, breitete sich ihre Wirkung schon über dreihundert Meter aus.«

Wie aber sollte man im Laboratorium Wellen untersuchen, deren Täler oder Berge 300 m voneinander entfernt waren? Wie sollte man ihre lichtähnlichen

Eigenschaften nachweisen, da man doch wußte, daß zum Beispiel für die Untersuchung von Beugungs- und Interferenzerscheinungen in den Geräten technische Parameter, zum Beispiel Spaltbreiten, erforderlich waren, die größenordnungsmäßig der Lichtwellenlänge nahekamen?

Erste Teilaufgabe für *Heinrich Hertz* war es demnach, die Frequenz der elektrischen Schwingungen so zu erhöhen, daß die (vorerst vermuteten) Wellen kurz genug waren, um im Laboratorium mit handlichen Versuchseinrichtungen nachgewiesen und untersucht zu werden.

Bekannt war bereits, daß die Frequenz der Entladungsschwingungen einer Leidener Flasche zunimmt, wenn die Kapazität der Flasche und die Induktivität in ihrem Leiterkreis abnehmen. *William Thomson* (1824 bis 1907) hatte hierfür einen rechnerischen Ausdruck gefunden, der seitdem als Grundformel für die Berechnung elektrischer Schwingungskreise gilt.

Hertz verzichtete, um möglichst niedrige Kapazitäten zu erhalten, völlig auf die althergebrachte Leidener Flasche und entwickelte einen Oszillator, auch Vibrator genannt, der das im Bild dargestellte Aussehen hatte:

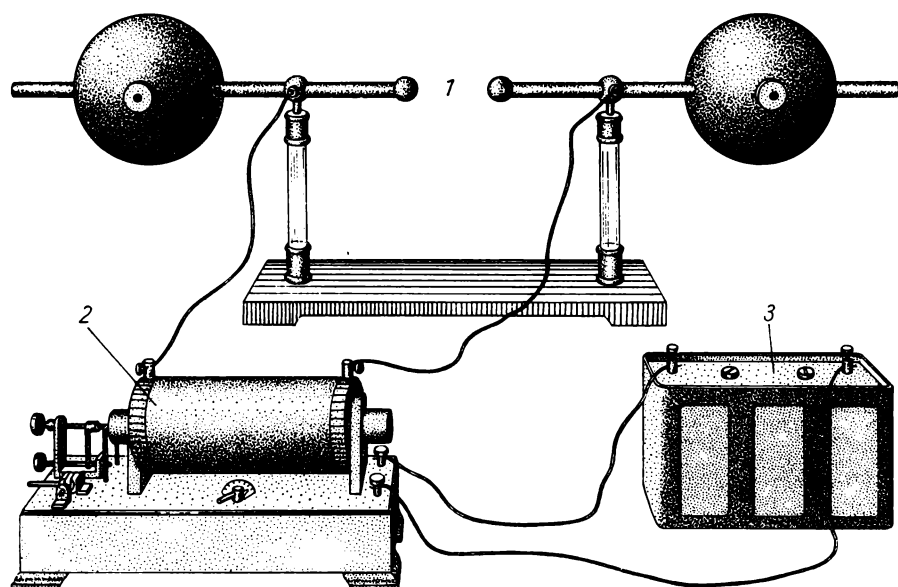
Zwei langgestreckte Drähte waren in der Mitte durch eine Funkenstrecke unterbrochen. Sie wurde von einem Funkeninduktor gespeist, der für eine ununterbrochene Funkenfolge sorgte. An den äußeren Leiterenden brachte *Hertz* Metallgebilde – Kugeln, Zylinder oder auch Platten – an, deren Kapazität die der Leidener Flasche ersetzte. Auf diese Weise erhielt *Hertz* Schwingungen, deren Dauer, wie er schreibt, zwischen dem hundertmillionsten und dem tausendmillionsten Teil einer Sekunde lag.

Der Sender für die vermuteten elektromagnetischen Wellen existierte also. Wer auch nur ein wenig in der Funktechnik bewandert ist, wird in ihm unschwer einen »offenen Schwingungskreis« erkennen, und jedem Rundfunkteilnehmer wird die Ähnlichkeit der Anordnung mit den heute üblichen UKW-Antennen auffallen.

Der Sender mußte durch einen Empfänger ergänzt werden, mit dessen Hilfe sich die Wellen nachweisen ließen. Lesen wir, wie *Heinrich Hertz* diese Frage löste:

»Es gibt hierfür ein sehr einfaches Mittel. Dorthin, wo wir die Kraft (d. h. die Wellen – Anmerkung des Autors) wahrnehmen wollen, bringen wir einen Leiter, etwa einen Draht, welcher durch eine feine Funkenstrecke unterbrochen ist. Die rasch wechselnde Kraft setzt die Elektrizität des Leiters in Bewegung und läßt einen Funken in ihm auftreten. Auch dieses Mittel mußte durch die Erfahrung selbst an die Hand gegeben werden, die Überlegung konnte es nicht wohl voraussagen. Die Funken sind nämlich mikroskopisch klein, kaum ein hundertstel Millimeter lang. Und ihre Dauer beträgt noch nicht den millionsten Teil der Sekunde. Es erscheint unmöglich, daß sie sichtbar sein sollten; aber im völlig dunklen Zimmer, für das geschonte Auge sind sie dennoch sichtbar. An diesem dünnen Faden hängt das Gelingen unseres Unternehmens. Zunächst drängt sich uns eine Fülle von Fragen auf. Unter welchen Umständen werden unsere Schwingungen am stärksten? Welche Form geben wir am besten dem empfangenden Leiter? Haben wir die Form festgesetzt, welche Größe wählen wir? Schnell zeigt sich, daß Beziehungen zwischen den Schwingungen und den empfangenden Leitern bestehen, die an die Resonanzerscheinungen der Akustik erinnern.«

132 Wie einfach liest sich dieser Absatz aus einem Vortrag von *Hertz*! Dahinter jedoch



Versuchsanordnung von
Heinrich Hertz
1 Oszillator; 2 Funkeninduktor;
3 Spannungsquelle

verbirgt sich monatelange, angestrenzte Arbeit, die, wie *Hertz* einmal bemerkte, ihn nicht selten glauben ließ, er sei lediglich »mühevoll in die Irre gegangen«.

Hertz benutzte (in heutiger Ausdrucksweise) Ultrakurzwellen von einigen Dezimetern Länge. Seinem Empfänger gab er bald die Gestalt eines Drahringens, der an einer Stelle durch eine Funkenstrecke mit sehr geringem Elektrodenabstand unterbrochen wurde. Die an ihr überspringenden, winzigen Fünkchen waren alles, wodurch sich elektromagnetische Wellen bemerkbar machen konnten und . . . bemerkt wurden. Dies ist eine Leistung, die allen höchste Bewunderung abverlangte, die *Hertz'* Versuche wiederholten; eine Leistung, die dem Hochfrequenztechniker der heutigen Zeit, der über ein ausgeklügeltes Instrumentarium empfindlichster Geräte und Apparaturen verfügt, oft nahezu unglaublich erscheint.

Wieviel einfacher wäre zum Beispiel die Arbeit von *Heinrich Hertz* gewesen, wenn ihm statt der Funkenstrecke seines Resonators auch nur der Kristalldetektor aus den Anfangsjahren der Funktechnik zur Verfügung gestanden hätte!

Trotz aller Schwierigkeiten aber registrierte *Hertz* nicht nur, daß Funken übersprangen – er maß die Intensität seiner »Strahlen elektrischer Kraft«, indem er mittels einer Mikrometerschraube den Abstand der Funkenstrecken-Elektroden variierte und feststellte, bis zu welchem Elektrodenabstand Funken übersprangen.

Der Oszillator und der entsprechende Resonator, in dem wir unschwer einen auf die Senderfrequenz abgestimmten Schwingungskreis erkennen, waren im Grunde das gesamte Instrumentarium von *Hertz*; auch die Zusatzeinrichtungen, die nach und nach hinzukamen, waren an Einfachheit kaum zu überbieten.

Die Versuche begannen, und wieder zeigten sich Schwierigkeiten, die manchmal zu unerwarteten, der Maxwell'schen Theorie scheinbar widersprechenden Ergebnissen führten. Jedes Leiterstück, jedes größere Metallgebilde im Versuchsraum verschluckte oder reflektierte die Wellen, beeinflusste ihre Richtung und störte ihre Ausbreitung.

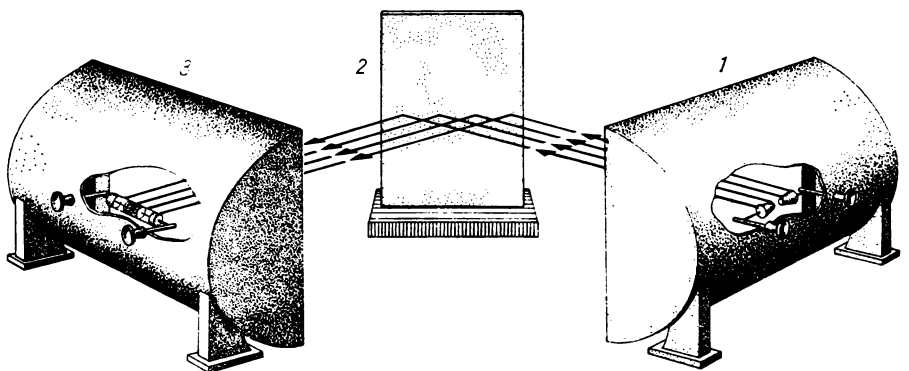
Hertz hatte mit den gleichen Schwierigkeiten zu kämpfen, die heute jeder kennt, der mit einer Zimmerantenne nach dem besten Fernsehbild sucht: Verrücken der Antenne um eine Handbreit, Drehen um einen kaum wahrnehmbaren Winkel verbessert oder verschlechtert das Bild, verstärkt oder beseitigt Geisterbilder, die durch unerwünschte Reflexionen hervorgerufen werden.

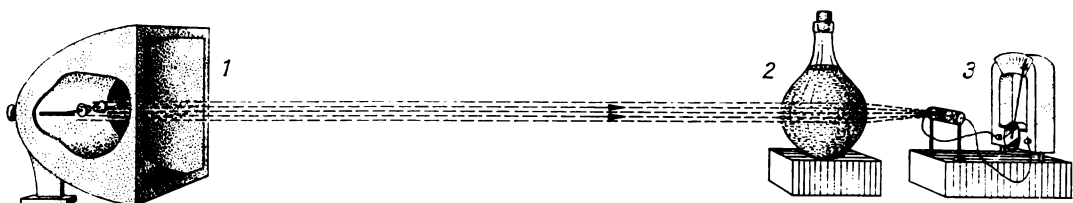
Wir sind, wenn wir mit der Antenne in der Hand unsere Wohnung absuchen, trotzdem in einer ungleich besseren Lage als *Hertz* – wir wissen, daß es die zu empfangenden Wellen gibt. *Hertz* mußte ihre Existenz erst nachweisen, mußte die Ursachen für die unterschiedlichsten, oft einander widersprechenden Resultate finden. Erst als er aus dem Hörsaal, der ihm für seine Experimente diente, Gaslampen, Gasrohre und andere Metallgegenstände entfernt hatte, wurden seine Versuchsergebnisse eindeutig.

Hertz setzte seinen Oszillator in Betrieb und untersuchte mit dem Resonator systematisch den Hörsaal, oft auf einem provisorisch gelegten Steg über die Sitzreihen balancierend. An manchen Stellen zeigten sich Fünkchen, an manchen wieder nicht. Das stimmte mit der Wellenvorstellung überein, wenn man annahm, daß sich stehende Wellen bildeten, oder daß Wellenzüge, die auf verschiedenen Wegen eine bestimmte Stelle des Raumes erreichten, miteinander interferierten. Um das nachzuprüfen, befestigte *Hertz* an einer Stirnwand des Hörsaales eine große Zinkblechtafel; nahe der gegenüberliegenden Stirnwand stellte er den Oszillator auf.

Aus den anschließenden Versuchen ergaben sich wichtige Resultate. Suchte man mit dem Resonator den Raum in der Verbindungslinie Oszillator – Resonator ab und variierte man jeweils die Entfernung Oszillator – Zinkblech, so ließ sich nach

Versuch nach Heinrich Hertz, um die Jahrhundertwende demonstriert: Die vom parabolischen Reflektor 1 ausgehenden Wellen werden an der Metallfläche 2 reflektiert und über den Reflektor 3 aufgefangen





Ein um die Jahrhundertwende
demonstrierter Versuch:

Flasche, mit einer isolierenden Flüssigkeit (z. B. Petroleum) gefüllt, bündelt die Wellen

1 Funkenstrecke im Parabolspiegel;
2 Flasche mit Petroleumfüllung;
3 Nachweisinstrument für elektromagnetische Wellen

einigem (in Wirklichkeit tagelangem!) Probieren nachweisen, daß sich die Stellen fehlender Fünkleinchen ebenso periodisch wiederholten wie die der größten Funkenintensität. Kein Zweifel: Hier handelt es sich um Schwingungsknoten beziehungsweise um Schwingungsbäuche.

Ließ *Hertz* die Wellen schräg auf die Zinkplatte fallen, wurden sie unter dem gleichen Winkel reflektiert, unter dem sie einfielen. Das aus der Wellenlehre, insbesondere aus der Optik bekannte Gesetz über Einfallswinkel und Ausfallswinkel galt auch hier.

Der Abstand der Schwingungsknoten beziehungsweise -bäuche ermöglichte eine unmittelbare Messung der Wellenlänge. Es versteht sich, daß *Hertz* sie sofort vornahm. Es ergaben sich, wie bereits erwähnt, Wellenlängen von einigen Dezimetern.

Die Wellenlänge war also bekannt, die Schwingungsdauer ließ sich errechnen. Was lag näher, als daraus die Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu bestimmen?

»Wir multiplizieren die gemessene Wellenlänge mit der berechneten Schwingungsdauer und finden eine Geschwindigkeit, welche der des Lichts verwandt ist.«

Hertz drückte sich vorerst vorsichtig aus, denn durch die erwähnten störenden Effekte hatten sich bei manchen Versuchen erhebliche Abweichungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit ergeben. Doch spätere Messungen zeigten, daß die Vorbehalte unnötig gewesen waren: Im »freien Raum« stimmen Lichtgeschwindigkeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Hertz'schen Wellen überein.

Daß es sich bei den »Strahlen elektrischer Kraft« um Wellen handelte, blieb nach diesen Indizien kaum zweifelhaft. Waren es Longitudinalwellen wie beim Schall oder Transversalwellen wie beim Licht?

»Wir halten unseren Draht in zwei verschiedenen Lagen in dieselbe Stelle der Welle – das eine Mal spricht er an, das andere Mal nicht. Mehr bedarf es nicht. Die Frage ist entschieden; es sind Transversalwellen.«

Denn, so fügen wir hinzu, bei Längswellen wäre die Orientierung des Resonators gleichgültig gewesen. Eine zusätzliche Bestätigung für die Transversalität ließ sich durch eine Erweiterung dieses Versuchs erreichen: Ein Rahmen, mit parallelen Drähten bespannt, wirkte als Polarisationsfilter. Je nach seiner Stellung im Wellenbündel ließ er Wellen passieren oder nicht.

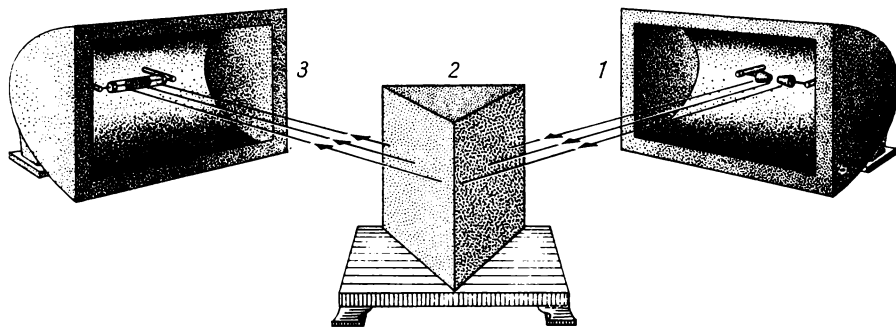
Doch *Hertz* genügten diese Resultate als Bestätigung der Wesensgleichheit von Licht und elektromagnetischen Wellen noch immer nicht. Sie mußten in allen Punkten ein »quasioptisches« Verhalten zeigen. Es nachzuweisen, galten *Hertz*' weitere Bemühungen.

Er ordnete die Funkenstrecke des Oszillators im Brennpunkt eines aus Blech angefertigten großen Hohlspiegels an. Wie sich mit dem Resonator nachweisen ließ, ging von diesem Spiegel ein nahezu paralleles Wellenbündel aus, wie man es unter entsprechenden Bedingungen auch mit Lichtwellen erhalten hätte. Traf das Bündel einen zweiten, gleichen Hohlspiegel, zeigte der Resonator, in dessen Brennpunkt angebracht, besonders kräftige Funken. Ohne es zu wissen, war *Hertz* zum Erfinder der Richtfunkstrecke geworden (im Französischen nennt man sie noch heute »Hertzsche Bündel«). Außerhalb des Bündels waren keine Wellen nachweisbar; ein Blech, in den Strahlengang gebracht, unterbrach die Verbindung.

Um der Lichtbrechung entsprechende Erscheinungen nachzuweisen, ließ sich *Hertz* ein mannshohes Prisma aus Pech anfertigen. Es brach die Wellen wie erwartet. Als *Hertz* schließlich die Interferenz elektrischer Wellen demonstrieren konnte, sah er sich am Ziel:

»Die Verbindung zwischen Licht und Elektrizität, welche die Theorie ahnte, vermutete, voraussah, ist hergestellt, den Sinnen faßlich, dem Geiste verständlich. Von dem höchsten Punkte, den wir erreicht haben, von der Paßhöhe selbst, eröffnet sich ein weiter Blick in beide Gebiete. Sie erscheinen uns größer, als wir sie bisher gekannt. Die Herrschaft der Optik beschränkt sich nicht mehr auf Ätherwellen, welche kleine Bruchteile des Millimeters messen, sie gewinnt Wellen, deren Längen nach Dezimetern, Metern, Kilometern rechnen. Und trotz dieser Vergrößerung erscheint sie uns von hier gesehen nur als ein kleines Anhängsel am Gebiete der Elektrizität. Dieses letztere gewinnt am meisten. Wir erblicken Elektrizität an tausend Orten, wo wir bisher von ihrem Vorhandensein keine sichere Kunde hatten. In jeder Flamme, in jedem leuchtenden Atome sehen wir

Versuch nach Heinrich Hertz, um die Jahrhundertwende demonstriert: Die von der Funkenstrecke im Parabolspiegel 1 ausgehenden Wellen werden durch das Pechprisma 2 auf den empfangenden Reflektor 3 gelenkt



einen elektrischen Prozeß. Auch wenn ein Körper nicht leuchtet, so lange er nur noch Wärme ausstrahlt, ist er der Sitz elektrischer Erregungen. So verbreitet sich das Gebiet der Elektrizität über die ganze Natur.«

Maxwells Theorie war glänzend bestätigt, die Lehre der Fernkräfte endgültig widerlegt, obgleich noch immer ein die Wellen tragender Lichtäther als unentbehrlich angesehen wurde. *Hertz'* Versuche, seine Berichte darüber erregten Aufsehen und wurden in immer neuen Varianten weitergeführt.

Hertz sah nicht voraus, daß sich die Technik seiner Entdeckungen fast unmittelbar nach ihrem Bekanntwerden annehmen und aus ihnen in überraschend kurzer Zeit eines der wichtigsten Kommunikationsmittel entwickeln würde.

Noch keine zehn Jahre waren nach dem frühen Tode von *Heinrich Hertz* vergangen, als Funkzeichen den Atlantik überquerten; weitere zwanzig Jahre später waren auf der Welt zahlreiche Rundfunksender in Betrieb, entstand die Ionosphärenforschung, deren Ergebnisse für Physik und Technik gleich wichtig wurden.

N

Strahlen aus dem Atom

amen und Werk der Forscherin, welche die Begriffe Radioaktivität – radioaktiv in die Wissenschaft einführte, kennt die ganze Welt. *Marie Curie geb. Skłodowska* prägte sie für eine Gruppe von Erscheinungen, deren Entdeckung Auswirkungen wie vielleicht keine andere auf physikalischem Gebiet hatte und deren Erforschung sie ihre ganze Arbeitskraft widmete.

Radioaktivität – radioaktiv: Diese Ausdrücke sind heute nicht weniger bekannt als der Name ihrer Urheberin. Sie haben die Menschheit mit Furcht und Hoffnung erfüllt, zwangen das Gewissen Tausender Forscher zu der Frage, wem ihre Arbeit dienen darf und soll, haben Millionen Menschen wachgerüttelt, über die Ursachen des Schreckens nicht nur nachzudenken, sondern sie zu bekämpfen.

Radioaktiv waren die vernichtenden Explosionsspitze von Hiroshima und Nagasaki.

Radioaktivität ist aber auch die entscheidende Eigenschaft der Stoffe, die, in Kernkraftwerken für friedliche Zwecke genutzt, uns und unsere Nachkommen von Energiesorgen befreien können.

Radioaktiv war die Asche, die, als Abfall imperialistischer Wasserstoffbombenversuche mit dem Wind treibend, japanischen Fischern lebenslanges Siechtum brachte.

Radioaktiv sind aber auch die Strahlen, die wir gegen Geschwulstkrankheiten einsetzen, sind Stoffe, die uns, indem wir ihren Weg verfolgen, bisher verborgene Vorgänge in Tier und Pflanze ebenso wie in unbelebter Materie signalisieren.

Auf der Radioaktivität beruhen zahllose Kontroll- und Meßinstrumente der modernen Produktionstechnik.

Radioaktivität – radioaktiv: Fluch oder Segen können diese Ausdrücke bedeuten. An uns liegt es, was sie sein werden.

Eigentlich begann alles mit einem Irrtum, mit der übereilten Deutung eines Experiments. Doch statt vorzugreifen, wollen wir uns lieber für wenige Minuten, am 20. Januar 1896, in eine Sitzung der Pariser Akademie der Wissenschaften begeben. Vor seinen Kollegen referiert *Henri Poincaré* (1854 bis 1912), Mathematiker und Physiker, über ein noch »druckfeuchtes« Thema: die X-Strahlen.

Wenige Wochen erst war es her, daß *Röntgen* sie entdeckte (s. S. 123). *Poincaré* beschrieb die Apparatur des deutschen Physikers, zählte die Wirkungen der X-Strahlen auf, ließ »Röntgenaufnahmen« von Hand zu Hand gehen. Was er zu berichten wußte, war so neu, so fesselnd, daß eine Bemerkung *Poincarés* fast überhört wird:

X-Strahlen, so etwa drückt er sich aus, rufen einerseits Fluoreszenz hervor, gehen aber andererseits von fluoreszierenden Stellen einer Katodenstrahlröhre aus. Das könnten Anzeichen für Zusammenhänge sein, vielleicht sogar dafür, daß fluoreszierende oder phosphoreszierende Substanzen zugleich auch Quelle unsichtbarer Strahlen sind.

Nur einer im Auditorium wiederholt *Poincarés* Worte immer wieder, und sie beschäftigen ihn so, daß er den weiteren Ausführungen kaum mit der nötigen Aufmerksamkeit zu folgen vermag. Zusammenhänge zwischen X-Strahlen und Fluoreszenz, zwischen Phosphoreszenz und unsichtbarer Strahlung... das muß man nachprüfen, unverzüglich und gründlich. *Henri Becquerel* (1852 bis 1908) eilt nach der Akademiesitzung sofort ins Labor und läßt Versuche zu *Poincarés* Vermutung vorbereiten.

Henri Becquerel entstammte einer alten Physikerfamilie. Hatte sich der Großvater vor allem durch Arbeiten auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre einen Namen gemacht, so lagen die Leistungen des Vaters auf dem Gebiet der Fotografie und dem der fluoreszierenden und phosphoreszierenden Substanzen. (Fluoreszierende Stoffe geben im wesentlichen nur Strahlung ab, solange sie selbst durch Strahlung »erregt« werden. Phosphoreszierende Substanzen strahlen auch noch mehr oder weniger lange nach der Erregung.) Er hatte sie gründlich untersucht, vor allem auch mit Hilfe der »neuen« Spektralanalyse (s. S. 104), und *Henri Becquerel* hatte diese Untersuchungen etwa ein Jahrzehnt lang fortgeführt.

Fluoreszenz- und Phosphoreszenzerscheinungen waren also, wie der Historiker *Gliozzi* es ausdrückte, so etwas wie ein »Familienthema« der *Becquerels*. Für *Henri Becquerel* ergab sich daraus der glückliche Umstand, über eine reichhaltige Sammlung an fluoreszierenden und phosphoreszierenden Substanzen verfügen zu können.

Röntgen hatte zum Nachweis seiner Strahlen lichtempfindliche fotografische Schichten benutzt. Sie würden sich, so hoffte *Henri Becquerel*, auch hier bewähren. Er packte Fotoplatten, jede für sich, lichtdicht ein, legte fluoreszierende Materialien darauf und brachte das Ganze für längere Zeit in die Sonne. Wenn die durch das Sonnenlicht bewirkte Fluoreszenz X-Strahlen oder ähnliche durchdringende Strahlen auslöste, mußten sich diese nach dem Entwickeln als Schwärzung der Fotoplatten bemerkbar machen.

Es dürfte eine schwere Geduldsprobe für *Becquerel* gewesen sein, die stundenlangen Belichtungszeiten abzuwarten. Doch er wollte sichergehen. Es konnte ja sein, daß die erhofften Strahlen so schwach waren, daß sie erst nach sehr langem Einwirken eine merkliche Belichtung der Platte hervorriefen.

Als *Becquerel* die entwickelten und fixierten, noch feuchten Platten gegen das Licht hielt, war er enttäuscht und überrascht zugleich: Nur eine Platte zeigte eine Schwärzung, alle anderen waren unbelichtet. *Becquerel* sah in seinen Notizen nach: Auf der geschwärzten Platte hatte ein Uransalz gelegen.

Er wiederholte den Versuch mit weiteren fluoreszierenden Stoffen, auch mit einer anderen Uranverbindung. Das Ergebnis änderte sich nicht. Bis auf diejenige unter der Uranverbindung blieben alle Platten unbelichtet. Weitere Versuche, weitere Uranverbindungen ergaben nichts Neues – ergaben es zunächst nicht.

140 *Becquerel* faßt zusammen: Von den fluoreszierenden Stoffen scheinen nur Uran-

verbindungen die von *Poincaré* ausgesprochene Vermutung zu bestätigen und, nachdem sie dem Sonnenlicht ausgesetzt waren, unsichtbare Strahlen auszusenden – »unsichtbare Fluoreszenz« nennt *Becquerel* sie zunächst vorsichtig. Am 24. Februar 1896 berichtet er der Pariser Akademie der Wissenschaften darüber. *Becquerel* unterbricht die Versuche für einige Tage, weil die Sonne nicht scheint. Gerade diese Unterbrechung sollte sich als folgenschwer erweisen: Als *Becquerel* eine der Fotoplatten entwickelt, die er zusammen mit den Versuchssubstanzen aufbewahrt hatte, zeigt sie sich belichtet.

Ein Fehler, eine Nachlässigkeit in der lichtdichten Verpackung? Nachdenklich wägt der Forscher die Platte in der Hand. Sie hatte im Dunkeln gelegen, außerdem hätte sich ein Verpackungsfehler wohl zuerst an den Rändern bemerkbar machen müssen. Diese aber waren unbelichtet, die Schwärzung trat nach der Mitte zu auf. Was aber konnte sonst die Ursache sein?

Becquerel musterte den Schrank: nein, kein Spalt, keine Ritze. Die Platte hatte unberührt bei einer Uranverbindung gelegen, niemand hatte sie zur Hand genommen, niemand in der Zwischenzeit den Schrank auch nur geöffnet. Hatten Röntgenstrahlen sie verdorben – und wenn, warum nur diese Platte, nicht auch die anderen? Aber auch diese Möglichkeit schied aus – seit Wochen war weder im Versuchsraum noch in den angrenzenden Zimmern eine Röntgenröhre in Betrieb gewesen. Sollten vielleicht die Uranverbindungen die Ursache sein, strahlten sie noch für Tage, nachdem die Anregung durch Licht aufgehört hatte?

Henri Becquerel besorgte sich frische Fotoplatten, suchte sich Uranverbindungen zusammen, die monate-, vielleicht jahrelang, in Schubladen und Sammelkästen verborgen, kein Tageslicht gesehen hatten:

Sie belichteten Fotoplatten!

Becquerel legte Stoffproben, die er aus Uranverbindungen im verdunkelten Labor erst zusammenstellte, auf die Fotoplatte: Sie belichten das Fotomaterial. Ebenso verhielten sich Uranverbindungen, die die Eigenschaft der Fluoreszenz überhaupt nicht aufweisen, und das Element Uran selbst.

Die Folgerung: Die unerklärlichen, vom Uran und seinen Verbindungen ausgehenden Erscheinungen haben weder mit Sonnenlicht noch mit Fluoreszenz etwas zu tun. Hier war etwas noch Unbekanntes im Spiel. Bereits am 2. März widerrief *Becquerel* seine erste Mitteilung und berichtete über die neuen Ergebnisse.

Waren es Röntgenstrahlen oder vielleicht bisher unbekannte Strahlen, die vom Uran und seinen Verbindungen ausgingen? Immerhin mußten ja X-Strahlen keineswegs die einzigen bisher unbekannten Strahlen sein...

Die Schwärzung der Fotoplatten, auch durch Stoffe, wie Glas, Holz, Glimmer, hindurch, hatten die »Uranstrahlen« mit Röntgenstrahlen gemeinsam. Ferner zeigte sich eine weitere Überraschung. In der Nähe eines Uranpräparates wurde Luft – wie durch Röntgenstrahlen – ionisiert; sie erwies sich in gewissem Grade als elektrisch leitend, was man nachweisen konnte, indem man ein geladenes Elektroskop in die Nähe stellte. Seine Blättchen fielen sehr rasch zusammen.

Andere Experimente sprachen gegen eine unmittelbare Verwandtschaft. So gelang es beispielsweise nicht, mit Hilfe des Urans »Röntgenaufnahmen« zu erhalten, wie sich überhaupt die Uranstrahlung in ihren Wirkungen schwächer als die normalerweise von einer Röntgenröhre ausgehende Strahlung erwies.

Uranstrahlen waren, das stand nach angestrengter Arbeit fest, den Röntgenstrahlen zwar ähnlich, aber nicht mit ihnen identisch. Becquerelstrahlen nannte man sie nun, und wenn sie auch die Öffentlichkeit nicht so erregten wie kurz zuvor die Röntgenstrahlen, der Wissenschaft legten sie eine lange Liste von Fragen vor:

Wie hingen die Strahlen mit dem Ausgangsmaterial, seiner Temperatur, seinem Aggregatzustand, seiner chemischen Zusammensetzung zusammen?

Waren Uran und seine Verbindungen die einzigen Substanzen, die Becquerelstrahlen aussandten, oder gab es noch weitere?

Wie lange strahlte Uran, wann erschöpfte sich seine Strahlung, woher stammte ihre Energie?

Was waren die Strahlen ihrem Wesen nach – Teilchen, wie die Katodenstrahlen, Wellen, wie Röntgenstrahlen, vielleicht sogar keines von beiden?

Welche Folgerungen ergaben sich aus der Existenz der Becquerelstrahlen, was ließ sich mit ihnen anfangen?

Besonders den ersten Fragen wandten sich zwei Forscher zu, die für die Antworten, die sie fanden, später zusammen mit *Becquerel* den Nobelpreis erhielten: *Marie Curie* (1867 bis 1934) und ihr Mann *Pierre Curie* (1859 bis 1906). Der Lebensweg *Marie Curies* und ihres Mannes ist so bekannt, daß wir uns darauf beschränken können mitzuteilen, was sie auf dem Gebiet der Radioaktivität (1898 prägte *Marie Curie* diesen Ausdruck für die Eigenschaft, Becquerelstrahlen auszusenden) leisteten.

Marie Curie wählte die von *Becquerel* entdeckten Erscheinungen als Thema ihrer Dissertation im Jahre nach *Becquerels* Veröffentlichungen.

Erstes wichtiges Ergebnis ihrer Untersuchungen war: Die Becquerelstrahlen, die radioaktiven Strahlen, sind eine Eigenschaft des Elements Uran, sie stammen aus den Uranatomen. Jede Uranverbindung strahlt, lediglich der in ihr enthaltene Urananteil beeinflusst die Strahlungsintensität.

Alle Versuche, von außen auf die Strahlung einzuwirken, erwiesen sich als vergeblich. Ob man die Proben radioaktiver Substanzen erhitzte, abkühlte, hohem Druck aussetzte, ob man sie schmolz oder verdampfte, pulverisierte oder kristallisieren ließ – an der Strahlung änderte sich nichts.

Aber die Radioaktivität war keine Eigenschaft des Urans allein. Bald konnte *Marie Curie* berichten: Auch das Element Thorium strahlt! Und nicht nur das: Bei der Untersuchung thoriumhaltiger Substanzen zeigten sich Unterschiede in der Strahlungsintensität, die auf das Vorhandensein mindestens einer weiteren radioaktiven Substanz schließen ließen.

»Nach einigen Monaten gelang es uns«, berichtet *Marie Curie*, »von der Pechblende eine Begleitsubstanz des Wismuts abzusondern. Diese Substanz war um ein Vielfaches aktiver als das Uran und besaß sehr charakteristische chemische Eigenschaften. Im Juli gaben wir die Entdeckung dieser Substanz bekannt, die ich zu Ehren meiner Heimat Polonium nannte.«

Doch die Liste der radioaktiven Stoffe war damit noch nicht vollständig:

»Bei der Darstellung des Poloniums bemerkten wir außerdem, daß die Pechblende noch einen anderen, neuen Begleitgrundstoff des Bariums enthielt. Nach weiteren Monaten beharrlicher Arbeit gelang es uns, diese zweite Substanz, die sich später als viel wichtiger als das Polonium erwies, vom Barium zu trennen; im Dezember

1898 konnten wir die wissenschaftliche Welt von der Entdeckung dieses neuen, heute bereits berühmten Grundstoffes unterrichten. Diesen Grundstoff nannten wir Radium.«

Ein Jahr später folgte noch ein radioaktives Element, das Actinium. Entdecker war ein Schüler und Mitarbeiter der *Curies*.

Fünf radioaktive Elemente kannte man nun. Sie ließen sich zwar in das Periodensystem einordnen, im übrigen aber war an ihrem Verhalten so gut wie alles rätselhaft.

Wie sollte man der Strahlung näherkommen, welche Hilfsmittel gab es?

Es waren im wesentlichen drei, eins so einfach wie das andere: die Fotoplatte, der Fluoreszenzschirm bzw. fluoreszierende Substanzen, wie sie schon *Röntgen* benutzt hatte, und das Elektroskop. Erleichtern würde die Arbeit, so schien es, daß vor allem Radium um ein Vielfaches intensiver strahlte als Uran oder Thorium. Es belichtete Fotoplaten durch Metallkassetten hindurch, entlud das Elektroskop sehr rasch und brachte schon in geringsten Mengen (und nur solche standen zur Verfügung) fluoreszierende Stoffe zum Leuchten.

Aber die vom Radium ausgehenden Strahlen zeigten sehr bald auch weit unangenehmere Wirkungen, intensiver noch, als man sie von Röntgenstrahlen hatte erfahren müssen: *Becquerel*, der für nur wenige Stunden ein Röhrchen mit einem Radiumpräparat bei sich getragen hatte, erlitt an der darunterliegenden Körperstelle schmerzhaftes Verbrennen. *Pierre Curie* nahm, sobald er davon erfuhr, Selbstversuche vor, die zu ganz ähnlichen Resultaten führten.

Der Umgang mit radioaktiven Substanzen war also, vor allem wenn es sich um das intensiv strahlende Radium handelte, nicht ungefährlich. Andererseits begannen sich, wie bei den Röntgenstrahlen, sehr bald Ärzte für die Strahlung zu interessieren, deren zellenzerstörende Wirkung sie zur Heilung mancher Krankheiten auszunutzen hofften. Doch das war ein fernes Ziel, solange man nicht mehr über Becquerelstrahlen wußte.

Zunächst war wieder die alte Frage zu klären: Handelt es sich um eine Wellen- oder um eine Teilchenstrahlung? Jetzt konnte man unter anderem schon auf Erfahrungen zurückgreifen, die man bei der Erforschung der Katodenstrahlen gesammelt hatte.

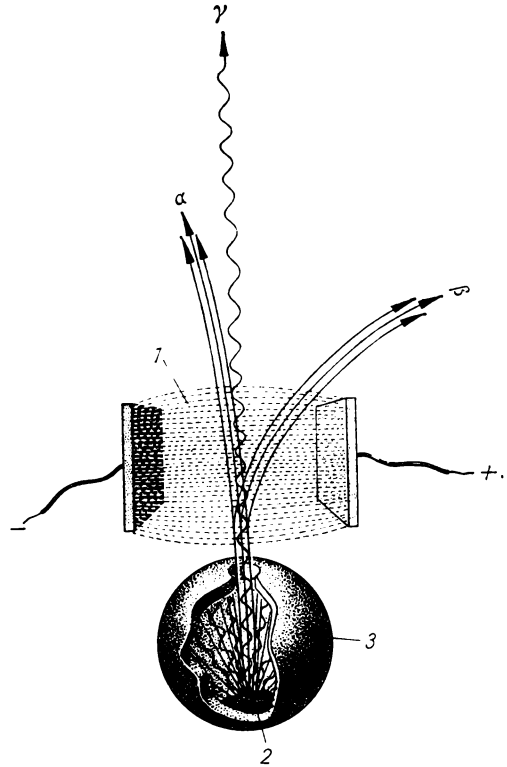
Eine Wellenstrahlung würde sich nicht durch elektrische oder magnetische Felder beeinflussen lassen; bestanden jedoch die Becquerelstrahlen aus geladenen Teilchen oder enthielten sie solche, mußte sich das durch eine Ablenkung im elektrischen und magnetischen Feld bemerkbar machen.

Man brachte ein Radiumpräparat in eine Bleikapsel, die, wie man wußte, die Strahlung zurückhielt, sofern ihre Wände dick genug waren. Nur durch eine kleine Öffnung konnte die Strahlung, so annähernd zu einem wirklichen Strahl geformt, ins Freie treten. Man ließ ihn, genau wie einst die Katodenstrahlen, durch magnetische und elektrische Felder laufen. Es kam zur Ablenkung – wenn auch anders, als man es sich vorgestellt hatte:

Nur ein Teil der Strahlung wurde durch das Magnetfeld oder durch ein elektrisches Feld beeinflußt, der andere ging unabgelenkt weiter.

Damit war immerhin zweierlei gewonnen: Zweifellos war die Radiumstrahlung nicht homogen, sondern aus mindestens zwei Anteilen zusammengesetzt, deren

Strahlung eines radioaktiven Präparates im elektrischen Feld
 1 elektrisches Feld; 2 radioaktives Präparat; 3 Bleikapsel



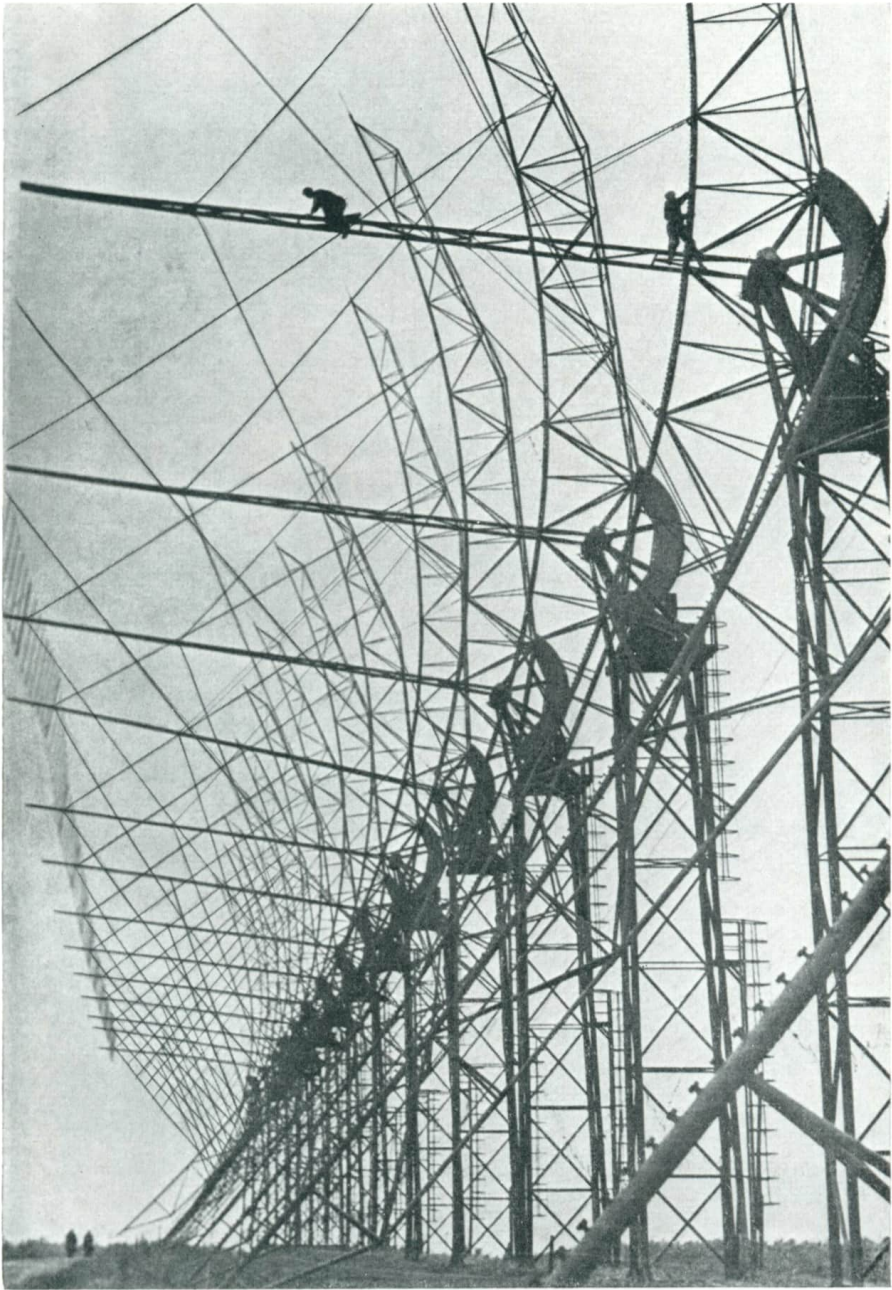
einer – nämlich der ablenkbare – aus elektrisch geladenen Teilchen bestand. Man nahm sich zunächst die Teilchen vor, die auf Felder »reagiert« hatten. Bereits die Richtung, nach der sie abgelenkt wurden, zeigte: Sie trugen negative Ladung, genau wie Katodenstrahlteilchen, wie Elektronen. Vielleicht waren es sogar Elektronen?

Man wandelte die bei Katodenstrahlen bereits bewährten Methoden entsprechend ab, maß die Größe der Ablenkung in Abhängigkeit von den Parametern der ablenkenden Felder, bestimmte das Verhältnis Ladung/Masse, untersuchte das Verhalten der Strahlung beim Eindringen in Luft oder in andere Stoffe. Schließlich konnte man zusammenfassen:

Der leicht ablenkbare Teil der Radiumstrahlen besteht aus Elektronen. Ihre Geschwindigkeit streut in einem weiten Bereich, ist jedoch im allgemeinen sehr groß, weit größer als die der Elektronen in Geißlerschen Röhren. Manche der vom Radium ausgestoßenen Elektronen erreichen Geschwindigkeiten, die bereits der Lichtgeschwindigkeit nahe kommen.

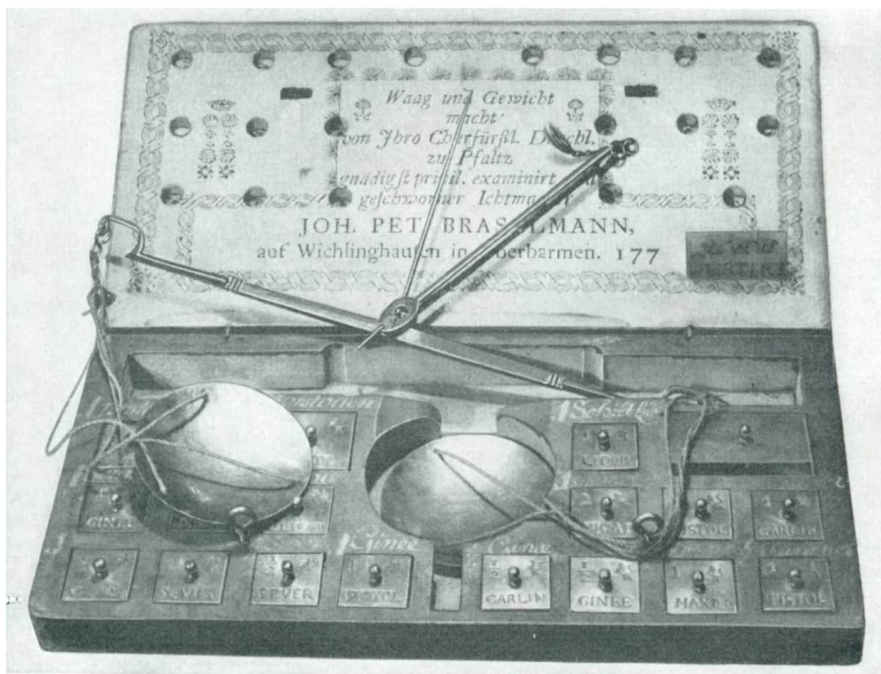
Und der andere Strahlenanteil, dessen Ablenkung den *Curies* nicht gelungen war? Die Nichtablenkbarkeit schien auf eine Wellenstrahlung hinzudeuten, das sonstige Verhalten auf eine Art Röntgenstrahlen. Doch irgend etwas stimmte nicht.

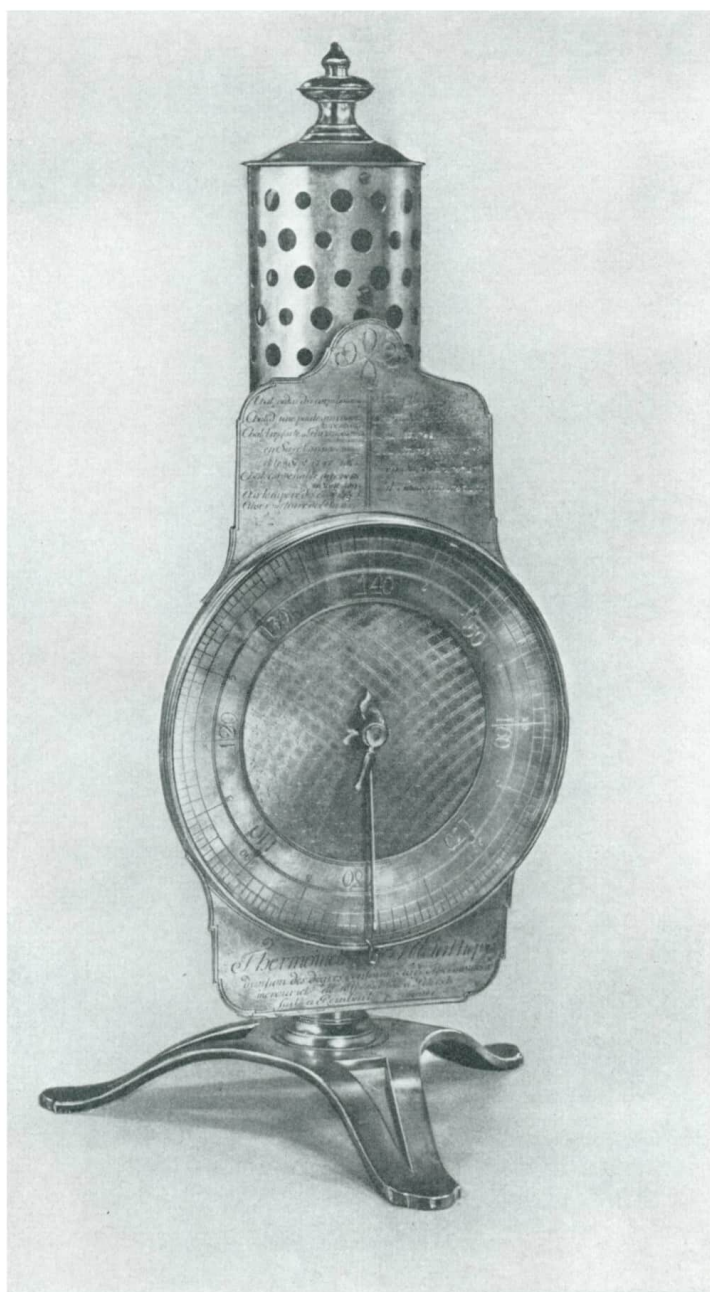
Man kannte die Gesetzmäßigkeit, nach der Röntgenstrahlen in Stoffe eindringen und von ihnen allmählich »aufgezehrt« wurden. Als man nun die bislang nicht abgelenkten Radiumstrahlen in Stoffe eindringen ließ, ergab sich ein ganz anderes



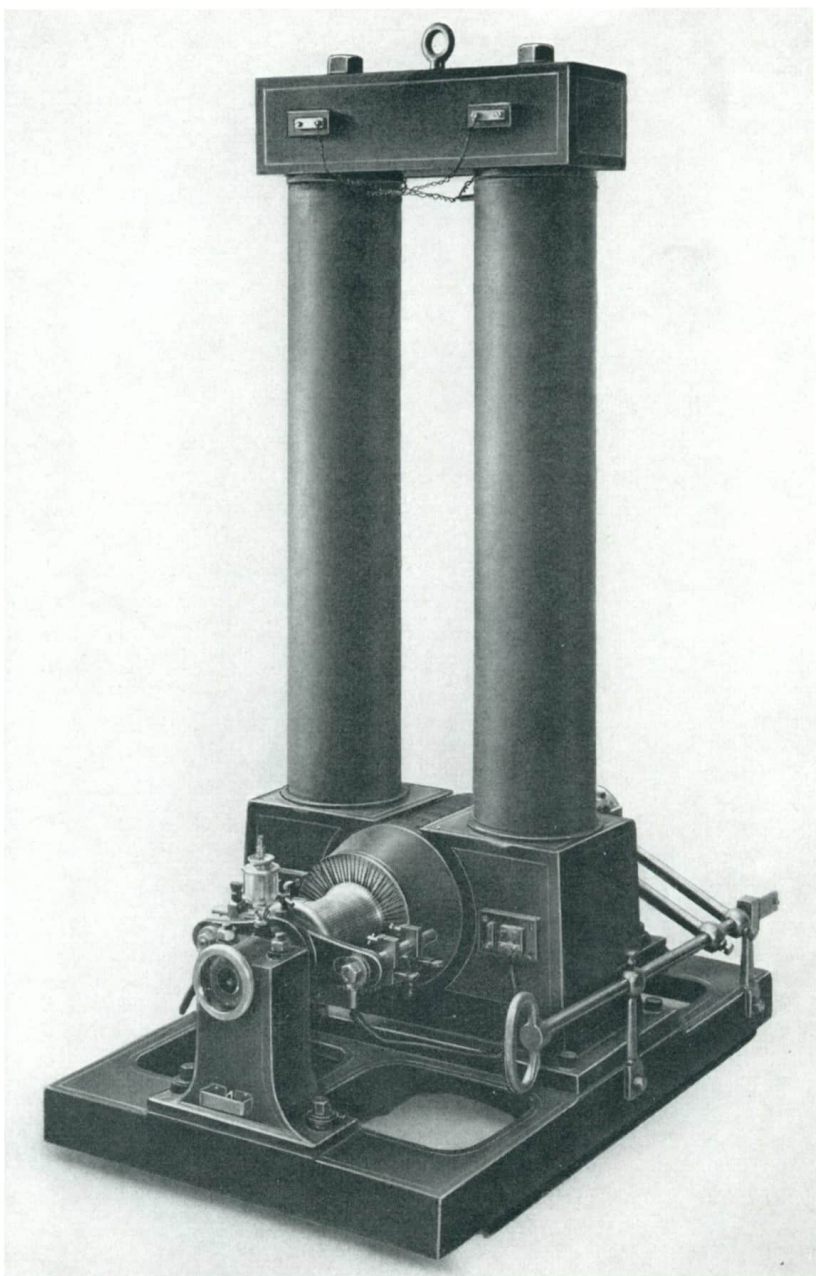
Radioteleskope zählen zu den »raumumfassendsten« Instrumenten der modernen Forschung. Foto: Nowosti

Waage mit Etui und 18 Wägestücken
 (J. P. Braselmann, Wichlinghausen,
 um 1775). Foto: Staatl. Math.-Phys.
 Salon Dresden





Metall-Thermometer auf Stativ, Skalenteilung nach Delisle (Löser-Werkstatt, Schloß Reinharz, 1746). Foto: Staatl. Math.-Phys. Salon Dresden



Gleichstrommaschine von Th. A. Edison (1879). Foto: Deutsches Museum München

Resultat: Bereits in dünnen Stoffschichten wurde offenbar der größte Teil dieser Strahlung absorbiert, ihre Intensität ließ stark nach. Der Teil jedoch, der durch eine solche Stoffschicht gelangt war, konnte anschließend wie harte Röntgenstrahlung verhältnismäßig dicke Stoffschichten durchdringen.

Das war nur erklärbar, wenn man annahm, daß es sich auch jetzt noch um ein Gemisch aus mindestens zwei Strahlenarten handelte, deren eine bereits von dünnen Stoffschichten zurückgehalten wurde. Wie aber diese Strahlen trennen?

Besonders den in Neuseeland geborenen, später in Kanada und England tätigen Physiker *Ernest Rutherford* (1871 bis 1937) beschäftigte diese Frage. Vielleicht, so sagte er sich, lassen sich die noch unerforschten Strahlungsanteile nur weniger einfach ablenken als Elektronen, vielleicht braucht man dafür robustere Mittel, größere Feldstärken zum Beispiel, als die *Curies* und andere sie anwenden konnten?

Rutherford, dem die technischen Hilfsmittel eines Universitätslaboratoriums zur Verfügung standen und der nicht, wie das Ehepaar *Curie*, gezwungen war, in einem notdürftig hergerichteten Schuppen zu arbeiten, machte sich erneut an Ablenkungsversuche. Seine Vermutung bestätigte sich: Der Strahl wurde nochmals aufgespalten. Ein Teil blieb unbeeinflusst und lief geradeaus weiter, der andere wurde abgelenkt.

Also nochmals eine Teilchenstrahlung – aber die Richtung der Ablenkung wies darauf hin, daß diese Teilchen positive Ladung mit sich führten. Weitere Teilungsversuche brachten keine neuen Ergebnisse. Die Becquerelstrahlen setzten sich also aus drei Komponenten zusammen, denen man die Anfangsbuchstaben des griechischen Alphabets beilegte:

Die Betastrahlen waren Elektronen, wie man sie bereits von den Katodenstrahlen her kannte.

Der nicht ablenkbare Anteil, Gammastrahlen genannt, erwies sich tatsächlich als Wellenstrahlung; den Röntgenstrahlen verwandt, jedoch mit viel kürzerer Wellenlänge.

Die Alphastrahlen endlich waren eine Teilchenstrahlung mit positiver Ladung – mehr darüber war vorläufig nicht bekannt. Deshalb konzentrierte man sich zunächst auf ihre Untersuchung.

Rutherford maß ihre Geschwindigkeit. Sie war geringer als die der Betastrahlen, lag aber immerhin noch bei 20 000 km/s.

Die Messung der spezifischen Ladung, die sich bei Katodenstrahlen als so wichtig und nützlich erwiesen hatte, wurde nun auch für Alphastrahlen ausgeführt. Bisher hatte man angenommen, kleinere elektrische Ladungen als die des Elektrons gäbe es nicht. Doch das Ergebnis bei Alphateilchen schien dieser Vorstellung zu widersprechen.

Das Verhältnis (positive) Ladung/Masse war beim Alphateilchen rund 3600mal kleiner als beim (negativen) Elektron.

Rutherford und sein Mitarbeiter *Frederic Soddy* (1878 bis 1956) konnten das nicht glauben, widersprach es doch allen bisherigen Erfahrungen. Da die spezifische Ladung ein Zahlenverhältnis darstellte, bestand aber noch eine andere Möglichkeit der Auslegung: Nahm man für den Zähler eine der negativen Elementarladung entsprechende positive Ladung an und multiplizierte statt dessen

den Nenner mit 3600, ergab sich ebenfalls die spezifische Ladung der Alphateilchen.

Doch was rechnerisch sofort einleuchtete, bereitete der physikalischen Deutung größte Schwierigkeiten. Nach der Rechnung mußte die Masse des Alphateilchens etwa doppelt so groß wie die eines Wasserstoffatoms sein!

War schon schwer zu begreifen, daß aus unteilbaren Atomen überhaupt etwas herauskam, so war nahezu unvorstellbar, daß dabei unter anderem Teilchen ausgeschleudert wurden, die so schwer waren wie (wenn auch leichte) Atome. Jahrhunderte hatte man gebraucht, um den Begriff des Atoms, des unteilbaren Elementarteilchens, herauszuarbeiten und nachzuweisen, daß die Transmutation der Elemente nicht mehr als eine Wunschvorstellung gewesen war. Allenfalls mit Elektronen, den viel leichteren »Elektrizitätsatomen«, hatte man sich abgefunden. War diese ganze Mühe doch sinnlos gewesen, hatte sie in die Irre geführt? Mußte man das unteilbare Atom aufgeben? War es kein elementarer Weltbaustein, sondern ein kompliziert zusammengesetztes, nicht einmal unveränderliches Gebilde? »Verbargen« sich die Alpha-, Beta- und Gammastrahlen bereits im Atom oder entstanden sie erst im Moment der Ausstrahlung? Was aber ging dann im Atom vor? Mußte man völlig umdenken, »sichere« physikalische und philosophische Vorstellungen einer grundsätzlichen Kritik unterziehen?

Das waren Fragen von geradezu fundamentaler Bedeutung. *Rutherford* und *Soddy* waren selbstverständlich mit solchen Gedanken vertraut, waren sich ihrer Tragweite wohl bewußt. Doch vor allem waren sie von der Richtigkeit ihrer Beobachtungen und Messungen so überzeugt, daß sie sogar vor einer anderen Schwierigkeit nicht zurückwichen.

Die Masse von Alphateilchen lag zwar in der Größenordnung derjenigen von Atomen, aber man kannte noch kein Atom von der doppelten Masse des Wasserstoffatoms. Der nächstschwerere Grundstoff nach dem Wasserstoff im Periodensystem war das Edelgas Helium, ein Element, das mit Hilfe der Spektralanalyse zunächst auf der Sonne, später auf der Erde entdeckt worden war. Nur war Helium viermal schwerer als Wasserstoff. Setzte man seine Masse in die Formel für die spezifische Ladung ein, sank ihr berechneter Wert auf die Hälfte des gemessenen.

Doch mußte das Alphateilchen unbedingt nur eine (positive) Elementarladung tragen? Konnten es nicht zwei sein? *Rutherford* und *Soddy* brauchten nicht einmal zum Bleistift zu greifen: In diesem Falle ging die Rechnung auf, gemessene und berechnete spezifische Ladung stimmten überein. Alphateilchen konnten aber dann nichts anderes sein als Heliumatome, die zwei Elektronen abgegeben hatten, zweifach ionisiert waren und daher nach außen hin zweifach positiv erschienen.

Die beiden Forscher ließen sich nicht anmerken, ob sie selbst vor der Kühnheit einer solchen Hypothese zurückschreckten oder nicht. Viele ihrer Kollegen jedoch schüttelten den Kopf, manche ließen es an anzüglichen Bemerkungen nicht fehlen: Durch starrsinniges Beharren auf derart – vorsichtig ausgedrückt – abwegigen Ideen würde man der Wissenschaft wenig nützen, um so mehr aber dem Ruf der britischen Hochschulen schaden...

Wir sollten die Skepsis dieser Wissenschaftler nicht vorschnell verurteilen; ihre Kritik entsprach dem »Schock«, den die Abkehr vom unteilbaren Atom ausgelöst

hatte, auslösen mußte. Außerdem hatten *Rutherford* und *Soddy* nur einen, wenn- gleich recht deutlichen Beleg für ihre Ansicht.

Überall, wo man radioaktive Stoffe fand, stieß man auf Heliumspuren. War nach *Rutherfords* Arbeiten nicht die natürlichste Annahme, daß dieses Helium nichts anderes darstellte als die »Mumien« von Alphastrahlen, daß es also aus den radio- aktiven Stoffen entstand, nicht aber durch irgendwelche unbekannten Vorgänge »von außen« zum ständigen Begleiter der radioaktiven Stoffe gemacht wurde?

Doch man brauchte, um einen Ausspruch *Rutherfords* zu zitieren, »den Dieb, nicht seine Fußspur«. *Rutherford* ertappte ihn in dem Augenblick, als es ihm gelang, das Spektrum der Alphastrahlen und damit das des Heliums zu erhalten.

Wenn aber, so *Rutherfords* Widersacher, Radium und andere radioaktive Stoffe Helium freisetzen, hier also sozusagen von allein und unbeeinflussbar geschah, was Alchimisten Jahrhunderte hindurch vergebens zu vollbringen versucht hatten, nämlich eine Elementumwandlung, was wurde denn dann aus dem Radium? Mußte es sich nicht auch verändern, weniger werden?

Feststellungen in *Rutherfords* Laboratorium und Beobachtungen des Ehepaars *Curie* gaben einen Hinweis, dem nachzugehen lohnend erschien.

Immer wieder erwiesen sich Luft und Gegenstände, die sich in der Nähe radio- aktiver Stoffe, zum Beispiel nahe bei Thorium und Radium, befunden hatten, selbst als radioaktiv. Ansätze, diese Erscheinungen mit Hilfe bekannter physika- lischer Gesetzmäßigkeiten zu erklären, hatten sich als unhaltbar erwiesen.

Wieder stellten *Rutherford* und *Soddy* eine von vielen Kollegen zurückgewiesene Behauptung auf: Thorium und Radium senden nicht nur Alpha-, Beta- und Gammastrahlen aus, sondern setzen außerdem eine wahrscheinlich gasförmige, gleichfalls radioaktive Substanz frei, die sich mit der Luft vermischt oder Körpern in der Nähe anhaftet. Man bezeichnete sie zunächst als Thorium- bzw. Radium- emanation.

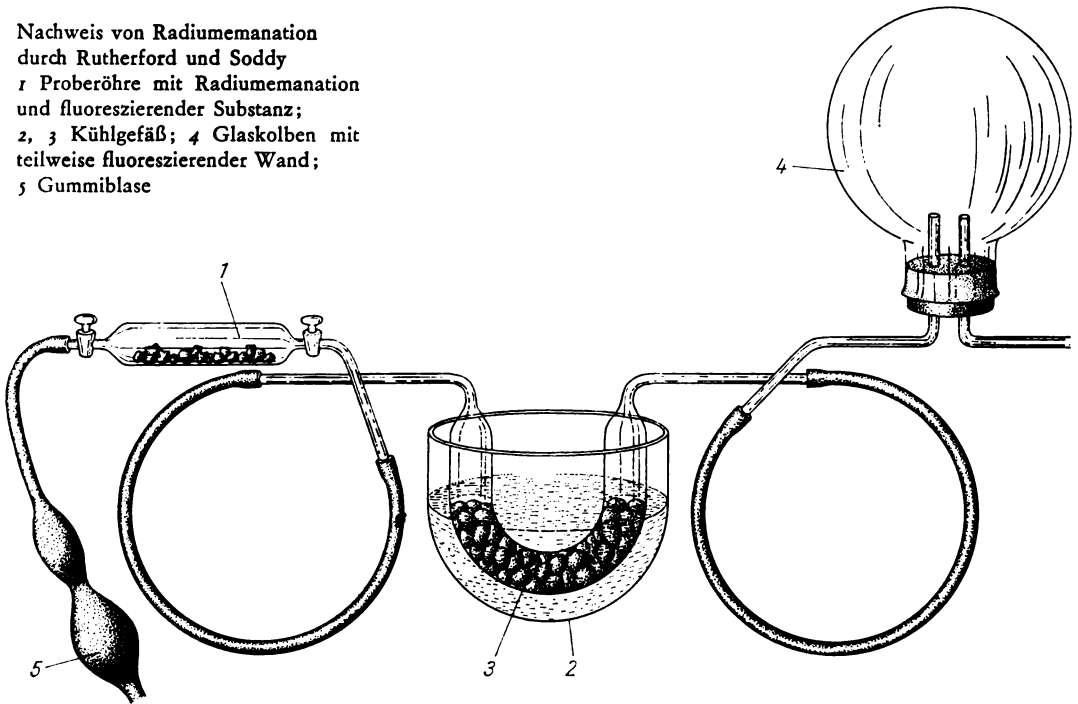
Vor allem letzterer war nun Gegenstand weiterer Untersuchungen. Gas oder kein Gas? Das war hier die erste Frage.

Rutherford und *Soddy* brachten ein unter Einwirkung radioaktiver Strahlung fluoreszierendes Präparat in eine weite, durch Hähne verschließbare Glasröhre. Es leuchtete, sobald man Luft aus der Umgebung einer radioaktiven Substanz in die Röhre füllte und diese danach verschloß. Öffnete man die Röhre, so daß es zum Ausgleich mit der Außenluft kommen konnte, hörte das Leuchten sehr schnell auf.

Dieser Versuch sprach zwar für die Gasnatur der Radiumemanation, reichte natür- lich aber nicht als Beweis aus. Ja, wenn sich Radiumemanation verflüssigen oder verfestigen ließe! Obwohl *Rutherford* und *Soddy* keine Vorstellung hatten, bei welcher Temperatur des vorerst nur vermuteten Gases die Verflüssigung eintreten könnte, entwarfen sie ein Experiment und führten es aus.

Sie verbanden die Proberöhre mit einem Glaskolben. Auch er enthielt fluores- zierendes Material zum Nachweis radioaktiver Strahlung. Die Verbindung zwis- chen Röhre und Kolben führte durch ein Kühlgefäß, das mit flüssiger Luft – wenige Jahre zuvor erstmals in größeren Mengen hergestellt – gefüllt werden konnte. Öffnete man den Hahn der Proberöhre, fluoreszierte die Nachweissubstanz im Glaskolben. Kühlte man jedoch das übertretende Gas durch flüssige Luft stark

Nachweis von Radiumemanation
 durch Rutherford und Soddy
 1 Proberöhre mit Radiumemanation
 und fluoreszierender Substanz;
 2, 3 Kühlgefäß; 4 Glaskolben mit
 teilweise fluoreszierender Wand;
 5 Gummiblase



ab, verschwand das Fluoreszieren, und zwar für die Dauer des Kühlens; anschließend kehrte es wieder.

Radiumemanation, Radon, wie man es bald bezeichnete, war also tatsächlich ein Gas, war sogar, wie sich zeigte, ein chemisches Element. Versuche, Verbindungen dieses Elements zu finden oder herzustellen, scheiterten. Radon verhielt sich wie ein Edelgas. Für ein solches Edelgas gab es im Periodensystem noch eine freie Stelle. Seine relative Atommasse mußte zwischen der von Wismut und der von Radium liegen.

Die Aufgabe, die relative Atommasse des Radons zu bestimmen, übernahm der Engländer *William Ramsay* (1852 bis 1916). Das Ergebnis seiner Arbeit war ein Triumph der von ihm entwickelten Wägemethoden für geringste Stoffmengen und – des Periodensystems. Die relative Atommasse des Radon lag, wie man vermutet hatte, bei 222.

Radium zerfiel demnach in Radon und Helium. Die relativen Atommassen beider zusammen ergaben annähernd die relative Atommasse des Radiums. Radon und Helium waren offenbar seine Bruchstücke.

Unverständlich blieb nach wie vor, daß das Radium selbst von diesen Vorgängen scheinbar unbeeinflusst blieb. Weder war ein Schwinden der anfänglich vorhandenen Radiummenge noch eine Intensitätsabnahme der Strahlung zu bemerken, deren Quelle nach wie vor rätselhaft war.

Galt diese scheinbare Unveränderbarkeit auch für das radioaktive Radon?

Man verschloß eine Radonprobe zusammen mit einem fluoreszierenden Stoff luftdicht in einem Glasrohr und überließ das Ganze sich selbst.

Bereits am dritten Tage meinten *Rutherford* und seine Mitarbeiter, eine Abnahme der Intensität des Fluoreszierens feststellen zu können; am fünften Tage waren sie sich ihrer Sache sicher. Das Leuchten ließ nach und war nach wenigen Wochen überhaupt nicht mehr feststellbar.

Die Physiker atmeten regelrecht auf. Endlich hatte man ein radioaktives Element gefunden, das nicht im Widerspruch zum Gesetz von der Erhaltung der Energie scheinbar ewig unverändert strahlte, sondern dessen Strahlung nach einer gewissen Zeit erlosch oder doch so gering wurde, daß sie sich der Beobachtung entzog. War Radon eine Ausnahme, oder verhielten sich andere radioaktive Stoffe ebenso, bezogen aber ihre Strahlung aus einem dermaßen großen Vorrat, daß eine Abnahme erst nach sehr langer Beobachtungszeit festzustellen wäre?

Doch bleiben wir vorerst beim Radon. Wenn, so überlegte man, seine Strahlung sich verändert, wie steht es dann um Radon selbst? Bleibt es Radon – wie Uran, Radium, Radium zu bleiben scheint – oder verändert es sich?

Die Untersuchung der Strahlung ergab: Radon sendet Alphateilchen aus – waren es Heliumionen?

Die Spektralanalyse sollte die Frage entscheiden helfen. Man füllte ein Luft-Radon-Gemisch in eine Geißlersche Röhre, brachte das Gas mit Hilfe des elektrischen Stroms zum Leuchten und untersuchte sein Spektrum. Es zeigte die bekannten Linien von Sauerstoff, Stickstoff usw., daneben neue Spektrallinien, die man dem Radon zuschrieb.

Als man nach einigen Tagen mit der gleichen Röhre den Versuch wiederholte, waren die Radonlinien bedeutend schwächer geworden. Dafür traten, von Tag zu Tag deutlicher, Spektrallinien von Helium hervor.

Bedurfte es eines noch überzeugenderen Beweises, daß Radon sich in Helium verwandelte (wobei die Frage nach anderen Bruchstücken einstweilen unbeantwortet blieb)? Eigentlich nicht; trotzdem war *Rutherford* noch nicht zufrieden und erweiterte den Versuch.

Die Radonprobe kam in ein Glasröhrchen mit einem so dünnen Fenster, daß Alphateilchen es durchdringen konnten. Dieses Röhrchen wurde in ein größeres gesetzt, das seinerseits mit einer Geißlerschen Röhre verbunden war. Die Anordnung wurde evakuiert.

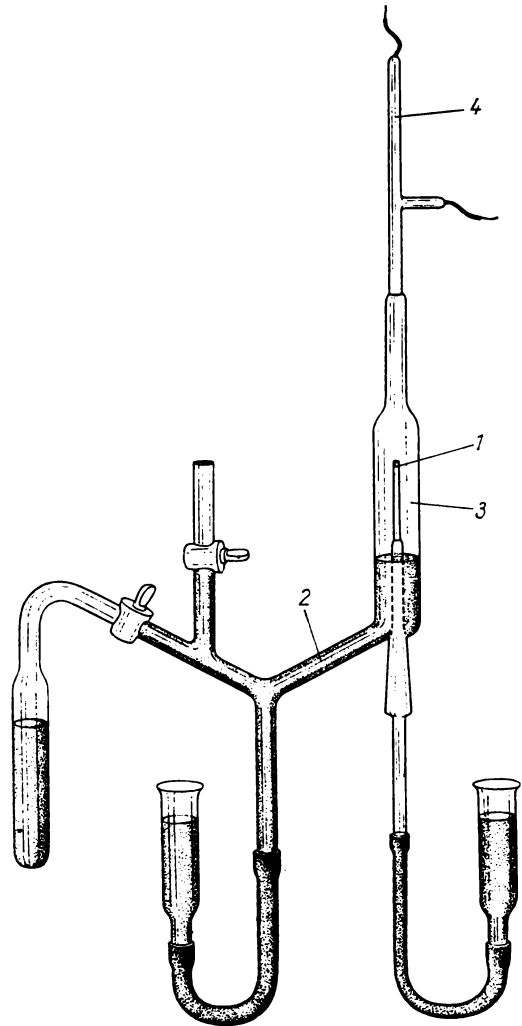
Legte man Spannung an die Geißlersche Röhre, war zunächst kein Spektrum zu beobachten; wegen des hohen Vakuums fehlte es an Atomen, die zum Leuchten angeregt werden konnten. Waren jedoch Alphateilchen und ionisierte Heliumatome identisch, mußten sich diese nach einiger Zeit, nachdem nämlich eine genügende Zahl von Alphateilchen durch das Fenster in die Geißlersche Röhre gelangt war, nachweisen lassen.

Diese Überlegungen erwiesen sich als richtig. Als die Geißlersche Röhre nach einigen Tagen erneut mit der Spannungsquelle verbunden wurde, leuchtete ihr Innenraum; das Spektrum zeigte deutlich die Linien des Edelgases Helium.

Kein Zweifel also auch hier: Radon zerfiel, zwar unbeeinflussbar, aber, wie weitere Untersuchungen zeigten, nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten. Eine davon wurde besonders wichtig.

Welche Mengen Radon man auch für einen Versuch wählte – stets waren nach gleichen Zeiten gleiche Bruchteile davon zerfallen. So war nach etwas weniger als

Nachweis der Heliumbildung beim radioaktiven Zerfall: Eine Radonprobe befindet sich im Röhrchen 1, das durch ein für α -Teilchen durchlässiges Fenster abgeschlossen wird. Wird nach einiger Zeit mit Hilfe des absperrenden Quecksilbers 2 das in der Röhre 3 befindliche Gas in den Ansatz 4 gedrückt, ist spektroskopisch Helium nachweisbar



vier Tagen von jeder beliebigen Ausgangsmenge nur noch die Hälfte übrig, nach weiteren vier Tagen die Hälfte des Restes, nach den folgenden vier Tagen davon wiederum die Hälfte usw.

Wie stand es um andere radioaktive Stoffe? Erneut nahm man sich das Radium vor. Durch bloßes Beobachten war seinem vermuteten Zerfall nicht auf die Spur zu kommen. Aber es gab einen anderen Weg. Man konnte auf die Verhältnisse beim Zerfallen rückschließen, wenn man die Alphateilchen zählte, die in einer bestimmten Zeitspanne von einer bekannten Zahl von Radiumatomen ausgesandt wurden.

Wie viele Atome eine gegebene Menge Radium enthielt, ließ sich mit Hilfe der sogenannten Avogadroschen Zahl ausrechnen. Außerdem stand im »Spinthariskop« ein sehr einfaches Instrument zur Verfügung, mit dem sich einzelne Alphateilchen beobachten ließen.

Die Bezeichnung »Instrument« ist eigentlich eine Übertreibung. Im wesentlichen war das Spinthariskop nicht mehr als ein kleiner fluoreszierender Schirm mit einer davor angebrachten Lupe. Jedes Alphateilchen, von einem radioaktiven Präparat ausgehend, ruft einen winzigen Lichtblitz hervor, »hell« genug, um in völlig dunklem Raum vom Auge wahrgenommen zu werden. Damals mußte der Beobachter die Lichtblitze zählen, heute hat die Elektronik auch das Spinthariskop modernisiert. Die Lichtblitze werden von einem hochempfindlichen »elektrischen Auge«, zum Beispiel einem Sekundärelektronenvervielfacher, beobachtet, in Stromstöße umgewandelt und steuern einen Zähler, dessen Arbeitsgeschwindigkeit die des menschlichen Auges vieltausendfach übertrifft.

Als man die Beobachtungen ausgewertet hatte, wußte man: Auch Radium lebt nicht ewig, sondern zerfällt nach dem gleichen Gesetz wie Radon, nur in einem anderen Zeitmaßstab. Nach etwa 1590 Jahren ist die Hälfte jeder vorhandenen Radiummenge in Radon und Helium zerfallen, nach weiteren 1590 Jahren die Hälfte des Restes usw. Man fand, daß das radioaktive Zerfallsgesetz für alle radioaktiven Substanzen gilt. Seitdem ist die »Halbwertszeit«, das heißt die Zeitspanne, in der die Hälfte einer gegebenen radioaktiven Substanz zerfällt, eine der wichtigsten Bestimmungsgrößen radioaktiver Stoffe. Sie gilt für den »Normalfall«, das heißt für eine große Anzahl von Atomen, ist also ein Mittelwert. Über die Lebensdauer eines einzelnen Atoms sagte sie nichts aus, ebenso wenig wie wir aus der Angabe einer durchschnittlichen Lebenserwartung ableiten können, ob eine bestimmte Person 20, 40 oder 80 Jahre alt werden wird.

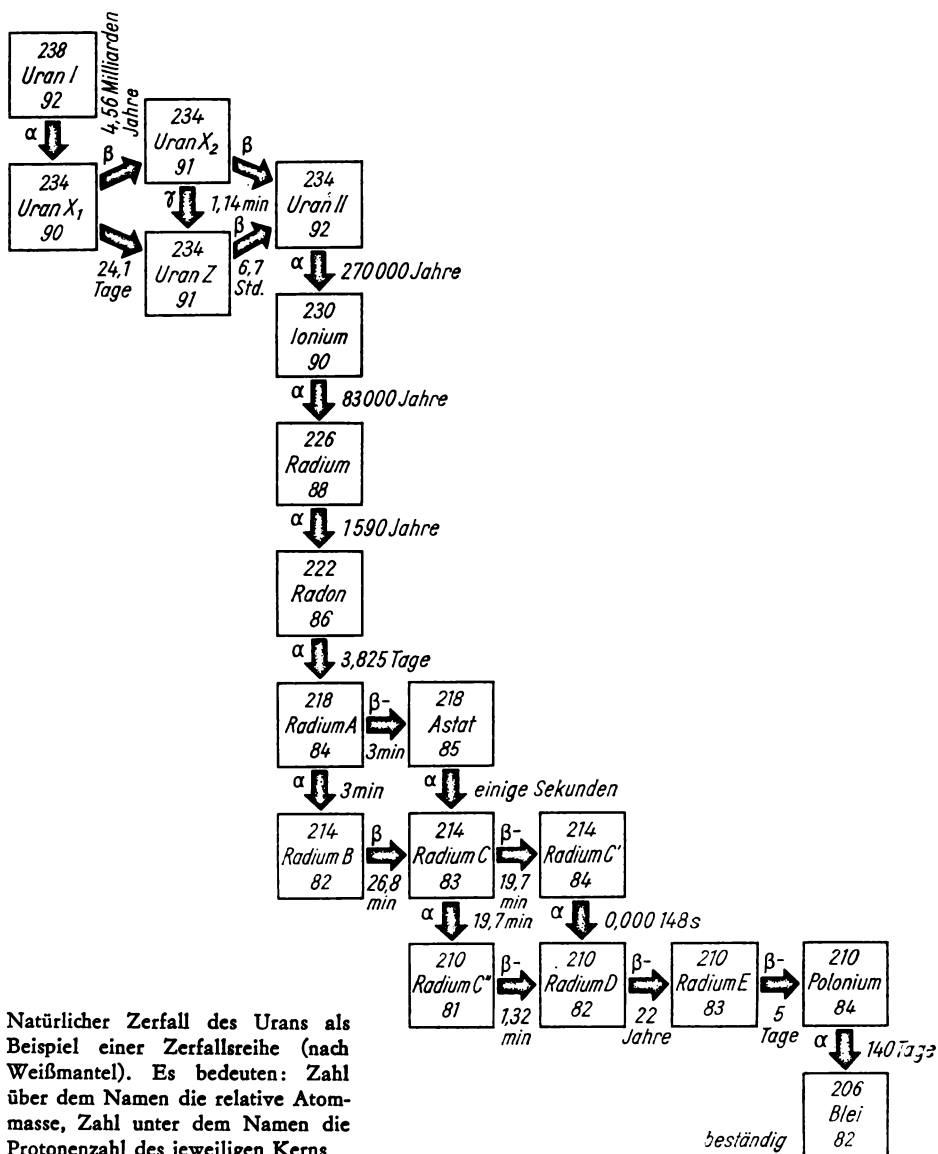
1590 Jahre – eine Zeitspanne, so lang, daß es durchaus verständlich war, daß der Zerfall des Radiums der Beobachtung zunächst entgangen war. Andererseits waren 1590 Jahre herzlich wenig im Vergleich zum Alter unseres Planeten. Hätte nicht längst das in der Erdkruste vorhandene Radium bis auf unmeßbare Spuren zerfallen sein müssen?

Eine ähnliche Frage hatte man beim Radon gestellt und sofort die Antwort darauf geben können: Radon zerfällt zwar, entsteht aber auch ständig neu aus Radium. Was lag näher als die Vermutung: Radium zerfällt zwar, aber es entsteht ebenfalls neu, und zwar aus ... das aber wußte man noch nicht. Doch diesmal fiel das Suchen nicht ganz so schwer. Wo Radium auftrat, gab es unter anderem stets auch Uran und Polonium. Sollten diese Stoffe vielleicht Vorfahren, vielleicht Großväter oder Väter des Radiums sein?

Auch das bestätigte sich. Es stellte sich heraus, daß Radium nur Zwischenstufe, Glied einer Kette ist, die über zahlreiche Zwischenstufen vom Uran über Radium, Radon und Polonium bis zum Blei führt – dieses erst ist stabil, strahlt und verändert sich nicht mehr. Dabei treten Halbwertszeiten zwischen Milliarden Jahren und Bruchteilen einer tausendstel Sekunde auf. Uran zum Beispiel, das den Anfang der Kette bildet, hat eine Halbwertszeit von 4,5 Milliarden Jahren: Daraus erklären sich die heute vorhandenen und für das Gewinnen von Kernenergie so wichtigen Uranvorräte auf der Welt.

Neben dieser radioaktiven Familie, deren Stammbaum mit dem Uran beginnt, wurden noch zwei weitere, ausgehend von Thorium und Actinium, gefunden. Später kam eine vierte hinzu, die mit Neptunium anfängt und beim stabilen Wismut endet.

Becquerel war, wir erinnern uns, einem »Familienthema« nachgegangen, wollte einem vermuteten Zusammenhang nachspüren. Er brachte eine Lawine ins Rollen. Sie riß mühsam erarbeitete Vorstellungen wie die vom starren, unveränderlichen Atom mit sich, schien denen, die sich die Welt als einen in einförmiger Wiederholung ablaufenden Mechanismus vorstellten, das Chaos heraufzubeschwören. Doch zugleich und vor allem schuf sie freies Gelände für neue Erkenntnisse und Fragen, die das Atom zum Beweis für die Vielseitigkeit und Unerschöpflichkeit der Materie werden ließen.



D

Das Experiment, das stets mißglückte

Das Blau des Äthers, zu dem die Lerche emporsteigt, die Ätherwellen, die uns Informationen, Töne und Bilder ins Heim tragen, haben heute nur noch in der Sprache der Literatur einen Platz. In den meisten Physikbüchern wird der Äther nicht einmal mehr erwähnt. Kein Schüler muß sich mehr mit ihm auseinandersetzen.

Nicht immer war das so. Für viele Physikergenerationen – bis in den Beginn unseres Jahrhunderts – hatte der Äther eine durchaus reale, wenn auch nicht im Sinne des Wortes »greifbare« Bedeutung. Obgleich es nie gelang, ihn sichtbar, hörbar oder fühlbar zu machen, ihn zu wägen oder sonstwie durch Messungen zu erfassen, obschon seine Eigenschaften sich in vielen Punkten so zu widersprechen schienen, daß den Forscher bei ihrem bloßen Aufzählen ein unbehagliches Gefühl ankam, war man von seiner Existenz überzeugt. Denn viele Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten ließen sich nur bei Annahme der Ätherhypothese deuten und verständlich machen.

Die wissenschaftlichen Fortschritte der letzten hundert Jahre machten den Äther entbehrlich, überflüssig, schließlich unhaltbar. Vorher hat aber die Ätherhypothese dazu beigetragen, den Weg der Wissenschaft zu ebnen.

Die Überschrift dieses Abschnittes ist ein wenig provozierend und mag Widerspruch hervorrufen. Denn mißglückt ein Experiment, trägt der Experimentator die Schuld. Auf jede richtig gestellte Frage – und nichts anderes ist ein Experiment – gibt es eine Antwort, mag diese nun ausfallen, wie man erwartet oder ganz anders. Mit den Experimenten, die hier in Rede stehen, war es nicht anders. Sie mißglückten nur insofern, als sie niemals die Zahlenwerte lieferten, mit denen man gerechnet hatte. Sie waren Erfolge, indem sie den Verzicht auf eine Vorstellung legalisierten, die sich, so nützlich sie lange gewesen war, zunehmend als Ballast erwiesen hatte.

Um das verstehen zu können, müssen wir zurückgehen – nicht bis in jene ferne Epoche, da *Aristoteles* den Äther neben Wasser, Feuer, Erde und Luft als fünftes Element betrachtete, »aus dem der Himmel bestünde«, sondern nur in jene Zeit, da die Physik zum ernsthaften Forschungsgegenstand geworden war und systematisch betrieben wurde.

Unter den ersten, die den Äther brauchten, war *Christian Huygens*. Die von ihm vertretene und im wesentlichen ausgearbeitete Theorie, die im Licht eine nach Gesetzen der Mechanik ablaufende Wellenbewegung sah (s. S. 88), konnte auf ein Medium, in dem die Lichtwellen entstehen und sich ausbreiten könnten, ebenso

wenig verzichten wie der Schall auf Luft oder einen anderen Körper als Vermittler der Wellen.

Wenn *Huygens* auch oft Parallelen zwischen Schall- und Lichtwellen zieht (er hält zum Beispiel beide für Längsschwingungen), grenzt er sie andererseits doch deutlich gegeneinander ab:

»Die jetzt folgende Untersuchung über das Wesen der von mir Äther genannten Materie, in welcher die von den leuchtenden Körpern kommende Bewegung sich ausbreitet, wird zeigen, daß diese Substanz nicht dieselbe ist wie diejenige, welche zur Ausbreitung des Schalls dient.«

Daß es sich um zwei verschiedene Medien handeln muß, ist leicht zu begründen. Die Glocke, im luftleeren oder nahezu luftleeren Raum angeschlagen, tönt nicht, ihr Schall findet kein Medium zur Ausbreitung; Licht geht ungehindert hindurch. Das ließ sich schon damals, nach der Erfindung der Luftpumpe, jederzeit vorführen.

Nicht nur beim Was?, sondern auch beim Wie? spricht sich *Huygens* für eine Unterscheidung aus. Schallwellen sind periodische Luftverdichtungen und -verdünnungen, dadurch ermöglicht, daß die Luftteilchen sich stets in gewisser, aber veränderbarer Entfernung voneinander befinden.

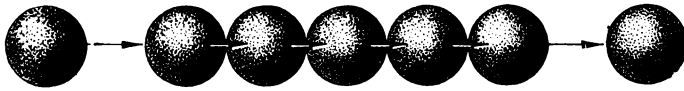
»Der außerordentlichen Geschwindigkeit und den übrigen Eigenschaften des Lichtes würde dagegen eine solche Art der Fortpflanzung nicht Genüge leisten. Ich will daher zunächst darlegen, von welcher Art dieselbe nach meiner Ansicht sein muß ...

Nimmt man eine Anzahl gleich großer Kugeln aus sehr hartem Material und ordnet sie in gerader Linie so an, daß sie sich berühren, so wird, wenn eine gleiche Kugel gegen die erste stößt, die Bewegung wie in einem Augenblicke bis zur letzten gelangen, die sich dann von der Reihe trennt, ohne daß man bemerkt, daß die übrigen sich bewegt hätten. Die Kugel, welche den Stoß ausgeübt hat, bleibt sogar unbeweglich mit den übrigen vereinigt. Es offenbart sich hierin also eine Bewegungsübertragung von außerordentlicher Geschwindigkeit, welche um so größer ist, je größere Härte die Substanz der Kugeln besitzt ...

Um nun diese Bewegungsart auf diejenige anzuwenden, durch welche das Licht erzeugt wird, nehme ich an, daß die Ätherteilchen aus einer Materie bestehen, welche der vollkommenen Härte sich so sehr nähert und so große Elastizität besitzt, wie man nur will. Für den vorliegenden Zweck brauchen wir weder die Ursache für eine solche Härte noch diejenige für die Elastizität zu untersuchen, da diese Betrachtung uns zu weit von unserem Gegenstande entfernen würde.«

Huygens knüpft also an die Vorgänge beim elastischen Stoß an, die uns, wenn nicht aus dem Physikunterricht, so doch vom Billard und von Ballspielen bekannt sind.

Mit diesen Ätherbällchen kann *Huygens* wichtige bekannte Tatsachen plausibel machen: zum Beispiel, daß Sternenlicht die Erde über größte Entfernungen erreicht, daß Lichtstrahlen einander kreuzen, ohne sich gegenseitig störend zu beeinflussen, schließlich auch, daß Körper sich ungehindert zwischen den Ätherteilchen bewegen, die er sich so winzig vorstellt, daß sie auch in den Lücken zwischen den Atomen und Molekülen reichlich Raum finden (woraus sich unter anderem die Durchsichtigkeit mancher Stoffe erklärt).



Stoßvorgang an elastischen Kugeln
als Vorbild für Huygens' Äthermodell

Huygens' großer Widersacher *Newton* benötigte den Äther nicht unbedingt, um die Ausbreitung seiner Lichtgeschosse zu erklären; auch in seinen berühmten Arbeiten auf dem Gebiet der Mechanik vermied er ihn. Das bedeutet jedoch nicht, daß er ihm, trotz seines oft betonten (und oft durchbrochenen) Grundsatzes, sich nicht auf Hypothesen einzulassen, immer und grundsätzlich ablehnend gegenüberstand.

Ihm wie vielen damaligen Forschern war die Ätherhypothese willkommenes Hilfsmittel, unbekannte Erscheinungen und Kräfte zu erklären.

Elektrische und magnetische Anziehung und Abstoßung, die Wärme, sogar Vorgänge wie Verwesung und Gärung wurden auf den Äther und seine Wechselwirkung mit den Stoffen zurückgeführt. Dies war, obgleich sich diese Vorstellungen als falsch erwiesen, zweifellos ein Fortschritt. An die Stelle geheimnisvoller Substanzen wie der eines Wärmestoffs, eines magnetischen oder elektrischen Fluidums und anderer Imponderabilien trat ein einheitlicher, wenngleich vorerst hypothetischer Begriff, der es ermöglichte, die bewährten Gesetze der Mechanik auf eben diese Erscheinungen anzuwenden.

Auch *Leonhard Euler*, von dessen Eintreten für die Wellenvorstellung vom Licht wir lasen (s. S. 91), war von der Existenz des Äthers überzeugt und beschreibt ihn:

»... Um uns eine Vorstellung von dem Äther zu bilden, brauchen wir nur die Luft zu betrachten. Diese ist zwar schon in der Nähe der Erdoberfläche eine sehr feine Materie, wird aber um so dünner, je mehr man in die Höhe steigt, um sich endlich sozusagen ganz zu verlieren oder vielmehr in den Äther überzugehen. Letzterer ist also eine Flüssigkeit wie die Luft, aber unvergleichlich viel feiner und verteilter, da wir wissen, daß die Himmelskörper ihn ungehindert durchschneiden, ohne in ihm einen merklichen Widerstand zu finden. Ohne Zweifel besitzt der Äther auch Elastizität, infolgedessen er sich nach allen Richtungen auszubreiten und jeden leeren Raum auszufüllen strebt...

Infolge dieser Elastizität findet sich der Äther nicht nur in den höheren Regionen, außerhalb unserer Atmosphäre, sondern er durchdringt sie vollständig und dringt auch in die Zwischenräume aller irdischen Körper ein, so daß er durch diese fast ungehindert hindurchgeht. Entfernt man nun aber mittels Luftpumpe die Luft aus einem Gefäße, so darf man nicht glauben, es befinde sich jetzt ein leerer Raum darin. Indem der Äther durch die Poren des Gefäßes tritt, erfüllt er es augenblicklich...

Wir werden uns demnach eine hinreichend genaue Vorstellung vom Äther bilden, wenn wir ihn als eine flüssige, der Luft ziemlich ähnliche Substanz betrachten, mit dem Unterschiede, daß der Äther unvergleichlich viel feiner und viele Male elastischer ist als die Luft.»

Eulers Ansichten haben viel zur Verbreitung der Ätherhypothese beigetragen – aber es blieben Vorstellungen. Beweise für die Existenz des Äthers konnte auch *Euler* nicht beisteuern, anderen erging es ebenso. Gerade dadurch, daß er »all-

gegenwärtig« war, auch den kleinsten Raum ausfüllte und sich darin weder einfangen noch daraus verdrängen ließ, entzog er sich jeder Messung. Immerhin »rechneten« manche seine Dichte aus. Sie sollte etwa 15 Trillionen mal kleiner sein als die Dichte der Luft.

So war und blieb man auf indirekte »Bestätigungen« angewiesen, für die meist die Astronomie herhalten mußte. Die Schwächung des Lichts ferner Sterne, geringfügige Veränderungen von Kometenbahnen sowie die Richtung der Schweife von an der Sonne vorbeifliegenden Kometen wurden als Beweis angeführt. Alle diese und andere Deutungsversuche erwiesen sich später als Irrtümer.

Die Argumente der Gegner der Ätherhypothese waren allerdings in keiner Weise überzeugender. Spekulationen zum Beispiel wie die, daß im Äther Licht verschiedener Farbe sich auch unterschiedlich schnell ausbreiten müßte, die Entfernung von Sternen daher Farbunterschiede oder -wechsel hervorrufen müßte, wurden schon damals nicht für ernst genommen.

Die Eigenschaften des Äthers blieben nicht nur widersprüchlich, sie wurden es um so mehr, je mehr ihn die Physiker beanspruchten.

Sich den Äther als eine Art Gas, wenn auch als Gas mit recht speziellen Eigenschaften, vorzustellen, mochte noch hingehen. Als jedoch die Fortschritte der Optik, insbesondere die Erforschung der Polarisationserscheinungen (s. S. 94) keinen Zweifel mehr daran ließen, daß es sich beim Licht nicht um Längs-, sondern um Querschwingungen des Äthers handelte, mußte diese Vorstellung aufgegeben werden; denn in einem Gas sind nur Längsschwingungen möglich.

Der Äther mußte, um Transversalwellen fortleiten zu können, die Eigenschaften eines festen Körpers haben, der aber – wie sich unter anderem aus der bekannten Lichtgeschwindigkeit ableiten ließ – viel härter und elastischer als alle bekannten Stoffe zu sein hatte.

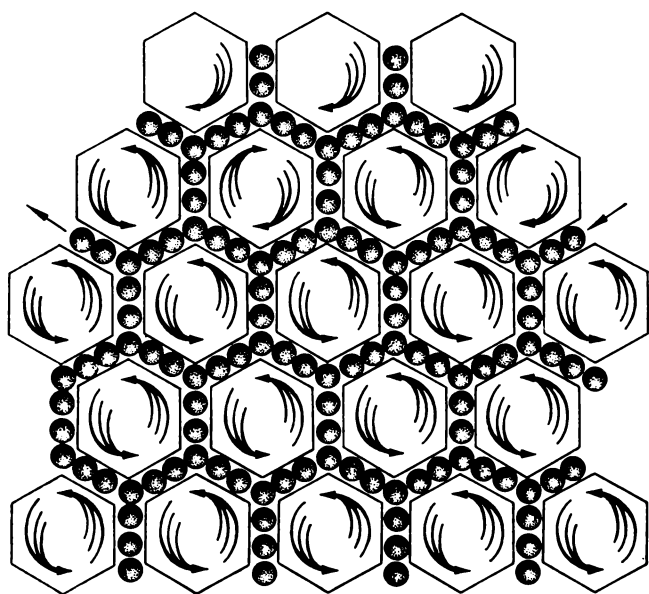
Auf der anderen Seite sollte der Äther absolut durchdringbar sein, durfte also zum Beispiel die Himmelskörper in ihrer Bewegung nicht im geringsten bremsen. Auch Masse durfte der »feste Körper« Äther nicht haben. . . .

Solche widersprüchlichen Eigenschaften wie Festigkeit einerseits und Durchdringlichkeit andererseits verlangten eine Erklärung oder wenigstens Veranschaulichung.

Eine Hand, so etwa sagte man, die auf Wasser schlägt, verspürt großen Widerstand, das Wasser erscheint ihr »hart«. Bei langsamem Eintauchen jedoch ist vom Widerstand des Wassers kaum etwas zu bemerken. Ähnlich verhält sich der Äther. Für das sehr schnelle Licht ist er hart, für die viel langsameren Bewegungen der Himmelskörper (und natürlich auch aller Körper auf der Erde) durchdringlich.

Verhielt sich der Äther wie ein fester Körper, mußten in ihm nicht nur Transversal-, sondern auch Longitudinalschwingungen möglich sein. Existieren sie, und wenn, wann würde man sie entdecken? Das war eine Frage, die sich bis zur Wende zum 20. Jahrhundert Physiker immer wieder stellten und deren Antwort sie mehrmals gefunden zu haben meinten. Auch Katoden- und Röntgenstrahlen wurden verdächtigt, Äther-Längsschwingungen zu sein.

An mechanischen Modellen, wie denn etwa der Äther aussehen könnte, war kein Mangel. Beim Versuch, die widersprüchlichen Eigenschaften zu vereinen, kamen teilweise recht skurrile Resultate ans Tageslicht. Sie reichten von »schaum-



Wabenmodell des Äthers nach Maxwell: »Kraftwirbel« werden durch »Kügelchen« voneinander getrennt

artigen« bis zu wabenähnlichen Gebilden aus Ätherteilchen, die wie durch Schraubenfedern miteinander verbunden sein sollten. Selbst die kompliziertesten Konstruktionen, mitunter von berühmten Physikern erdacht und immer wieder korrigiert, befriedigten nicht, konnten zum Beispiel nicht erklären, daß nur manche Stoffe durchsichtig waren, obwohl der Äther doch alle ausfüllte. Trotzdem dachte kaum ein Gelehrter daran, die Ätherhypothese aufzugeben. In seiner »Dialektik der Natur« schreibt *Friedrich Engels* noch Jahrzehnte später:

»Der Äther ist schon des Lichts wegen nicht zu entbehren.« Gleichzeitig jedoch wendet er sich entschieden gegen die nicht seltenen Versuche, den Äther als »immateriell« zu mystifizieren: »Wenn er überhaupt ist, muß er materiell sein.«

Das Beharren auf der Ätherhypothese hatte vor allem zwei Gründe. Einmal war es nach wie vor Ziel der Naturwissenschaft, physikalische Erscheinungen auf die Gesetze der Mechanik zurückzuführen, die ja am längsten bekannt und am besten durchgearbeitet war. Zum anderen waren durch die Arbeiten von *Faraday*, *Maxwell*, *Hertz* und ihren Kollegen (s. S. 130) ganz neuartige Gesichtspunkte aufgetaucht: Das elektrische und das magnetische Feld mit ihren von Punkt zu Punkt im Raum fortschreitenden Wirkungen, die Einordnung des Lichts in ein breites Spektrum elektromagnetischer Wellen paßten schlecht zur Mechanik der »Massenpunkte« und der unvermittelt zwischen ihnen wirkenden Kräfte.

Der Äther könnte, so nahm man an, eine Art Verbindungsglied bilden, das es gestattete, Mechanik und Feldtheorie widerspruchsfrei zusammenzuführen.

Nach wie vor aber stand die Frage offen: Gibt es nun den Lichtäther, oder gibt es ihn nicht?

Beobachtungen und Messungen aus den Bereichen der Optik, der Astronomie und der elektromagnetischen Erscheinungen hatten zu dem Schluß gezwungen:

Der Äther befindet sich, sofern es ihn gibt, stets in Ruhe. In ihm schwimmen alle Körper, vom Fixstern und vom Planeten bis zum Atom, in ihm verlaufen sämtliche physikalischen Vorgänge.

Jedem bewegten Körper müßte daher gegenüber dem ruhenden Äther ähnliches widerfahren wie einem Fahrzeug gegenüber der (ruhenden) Luft: Es müßte Fahrtwind, hier ein Ätherwind zu beobachten sein. Oder umgekehrt: Gelang es, einen solchen Ätherwind irgendwie nachzuweisen, wäre dies zugleich ein untrüglicher Beweis für die Existenz des Äthers.

Diesen Beweis zu führen, setzte sich der in Polen geborene, später lange Zeit in den USA wirkende Physiker *Albert Abraham Michelson* (1852 bis 1931) zum Ziel. *Michelson*, Physiknobelpreisträger des Jahres 1907, hatte vor allem auf dem Gebiet optischer Präzisionsmessungen gearbeitet, Erfolge errungen und wichtige Instrumente, wie das nach ihm benannte Interferometer zur Messung von Lichtwellenlängen oder deren Differenzen, entwickelt. Außerdem stand ihm ein qualifizierter Mitarbeiterstab zur Verfügung, von dem ihn besonders *Edward William Morley* (1838 bis 1923) bei den entscheidenden Experimenten unterstützte.

Der Gedankengang des Michelson-Versuchs zum Nachweis des Ätherwindes sei durch folgenden Vergleich veranschaulicht:

Auf dem Deck eines Schiffes wird bei Windstille ein Ball vom Bug zum Heck und zurück geworfen. Solange das Schiff stillliegt, braucht der Ball (gleiche Anfangsgeschwindigkeit vorausgesetzt) für die Strecke Bug-Heck die gleiche Zeit wie in der Gegenrichtung – seine Geschwindigkeit ist in beiden Richtungen gleich. Sobald das Schiff Fahrt aufnimmt, weht Fahrtwind in Richtung Bug-Heck. Die Geschwindigkeit des Balls wird jetzt in der Richtung Bug-Heck um die Geschwindigkeit des Fahrtwindes (dem Betrag nach also um die Fahrtgeschwindigkeit des Schiffs) vergrößert, er erreicht das Heck eher als bei ruhendem Schiff. Beim Werfen Heck – Bug bremst der Fahrtwind, der Ball erreicht den Bug später als bei stillliegendem Schiff. Offenbar lassen sich Fahrtwind bzw. Schiffsgeschwindigkeit aus dem Abstand der beiden Werfenden und aus der jeweiligen Flugzeit errechnen.

Diese Überlegungen übertrugen *Michelson* und *Morley* auf den Äther. Ihr Ball war Licht, dessen Geschwindigkeit, wenn es sich »mit dem Ätherwind« ausbreitete, zunehmen, in der Gegenrichtung aber abnehmen mußte. Werfender war eine Lichtquelle, und das Schiff?

Eine Schätzung des zu erwartenden Resultats ergab, daß die sich mit dem Schiff bewegendes Lichtquelle eine möglichst große Geschwindigkeit haben sollte, wenn überhaupt meßbare Resultate auftreten sollten. *Michelson* und *Morley* wählten daher als Schiff die Erde.

Die Erde umkreist die Sonne mit einer Bahngeschwindigkeit von rund 30 km/s, der Ätherwind müßte demnach genauso schnell wehen. Mit anderen Worten: Ein Beobachter auf der Erde müßte für Licht, in Richtung der Erdbahnbewegung geschickt, eine Geschwindigkeit von 299 970 km/s messen, für Licht in der Gegenrichtung dagegen 300 030 km/s, sofern wir den »glatten« Wert 300 000 km/s für die Lichtgeschwindigkeit einsetzen.

Auch dieser Unterschied war noch so gering, daß er nur mit allerempfindlichsten Präzisionsmeßinstrumenten feststell- und meßbar war.

Solche Meßinstrumente waren vor allem auf Grund der Interferenzerscheinungen möglich. Die Wellenlängen des Lichts zählten nach zeh- und hunderttausendsten Teilen eines Millimeters; zwei Lichtwellen aber löschten sich (s. S. 92) unter entsprechenden Bedingungen bereits aus, wenn ihr Wegunterschied nur die Hälfte einer Wellenlänge betrug.

Michelson hatte mit seinem Interferometer ein Instrument beige-steuert, das geringste Wegunterschiede zu messen gestattete. Das ist sein Arbeitsprinzip:

Ein Lichtstrahl L , ausgesandt zum Beispiel von einem Funken oder einer Bogenlampe, trifft auf einen zur Strahlrichtung unter 45° angeordneten halbdurchlässigen Spiegel S_1 . An diesem teilt er sich, ein Teilstrahl L_1 passiert den Spiegel und erreicht einen zweiten Spiegel S_2 . Dieser ist so justiert, daß L_1 »in sich« reflektiert wird, der Rückweg also mit dem Hinweg zusammenfällt. Der andere Teilstrahl L_2 entsteht durch Reflexion am Spiegel S_1 . Auch er wird von einem Spiegel S_3 in sich reflektiert.

Die beiden reflektierten Strahlen werden von S_1 wiederum teils durchgelassen, teils reflektiert. Dabei interessieren uns nur die beiden Teilstrahlen A und B. Sie haben, sofern S_2 und S_3 gleich weit von S_1 entfernt sind, dieselbe Wegstrecke hinter sich, treffen also am Schirm Sch phasengleich ein und verstärken sich. Wird einer der beiden Spiegel S_2 und S_3 verschoben, treten Gangunterschiede und infolgedessen Interferenzerscheinungen auf. Bereits bei einer Wegdifferenz der Strahlen A und B von einer halben Lichtwellenlänge löschen sich die Teilstrahlen aus. Verändert man die Entfernung eines Spiegels stetig, ist auf dem Schirm Sch eine Folge einander abwechselnder dunkler und heller Streifen zu beobachten.

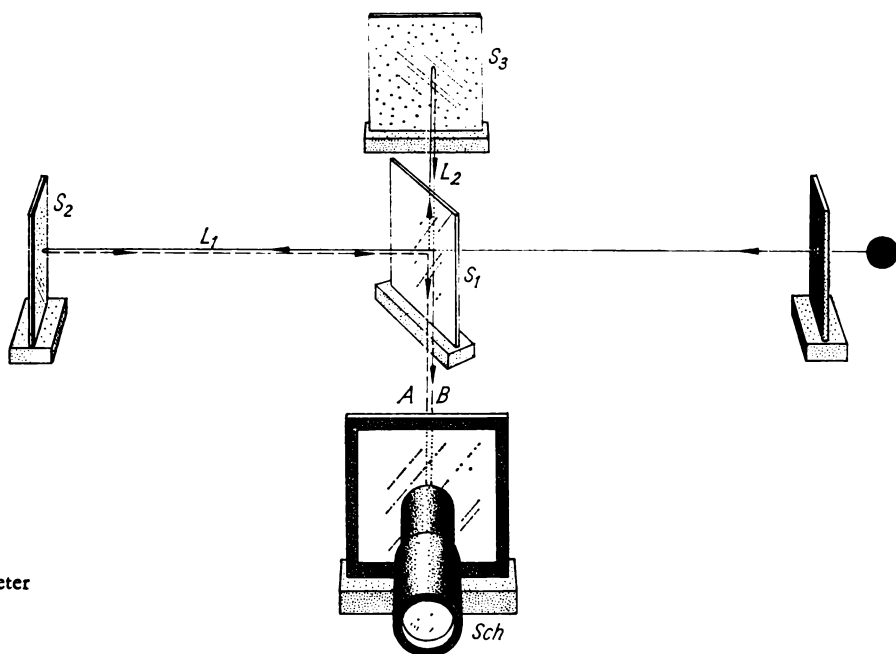
Bei bekannter Lichtwellenlänge kann man so zum Beispiel die Verschiebung eines der Spiegel mit größter Genauigkeit messen. Ist dieser Spiegel fest mit einem Gegenstand verbunden, sind Längen- und Dickenmessungen höchster Präzision möglich – ein Verfahren, das heute sehr häufig benutzt wird.

Ist umgekehrt die Spiegelverschiebung bekannt, wird es möglich, Lichtwellenlängen zu messen – eine Methode, die man unter anderem anwendet, um Längennormale wie das Urmeter in Vielfachen einer Lichtwellenlänge auszudrücken.

Es gibt aber noch eine dritte Möglichkeit, und gerade auf sie kam es bei *Michelsons* Versuchen an. Bleiben Lichtwellenlänge und Spiegelabstand unverändert, traten aber trotzdem durch Interferenz bedingte Helligkeitsänderungen auf, kann ihre Ursache nur in Änderungen der Lichtgeschwindigkeit nach verschiedenen Richtungen und dem durch sie bewirkten unterschiedlichen Eintreffen von Wellenbergen und -tälern liegen.

Nach solchen Geschwindigkeitsänderungen, durch den Ätherwind verursacht, suchten *Michelson* und *Morley*. Das Interferometer mit seiner erstaunlichen Empfindlichkeit und Genauigkeit war hierfür das geeignete Meßinstrument.

Allerdings arbeitete es nicht mit zwei »Werfenden« (wie unser Beispiel), sondern mit einem, der Lichtquelle, und einer den »Ball« zurückwerfenden Wand, das heißt einem Spiegel. Es war daher nicht möglich, die Lichtgeschwindigkeiten »mit« und »gegen« den vermuteten Ätherwind einzeln zu bestimmen, sondern nur die Geschwindigkeit, die sich für Hin- und Rückweg ergab (die Geschwindigkeitsänderungen bei Hin- und Rückweg heben einander, einem verbreiteten Fehlschluß zum Trotz, nicht auf).



Michelsons Interferometer

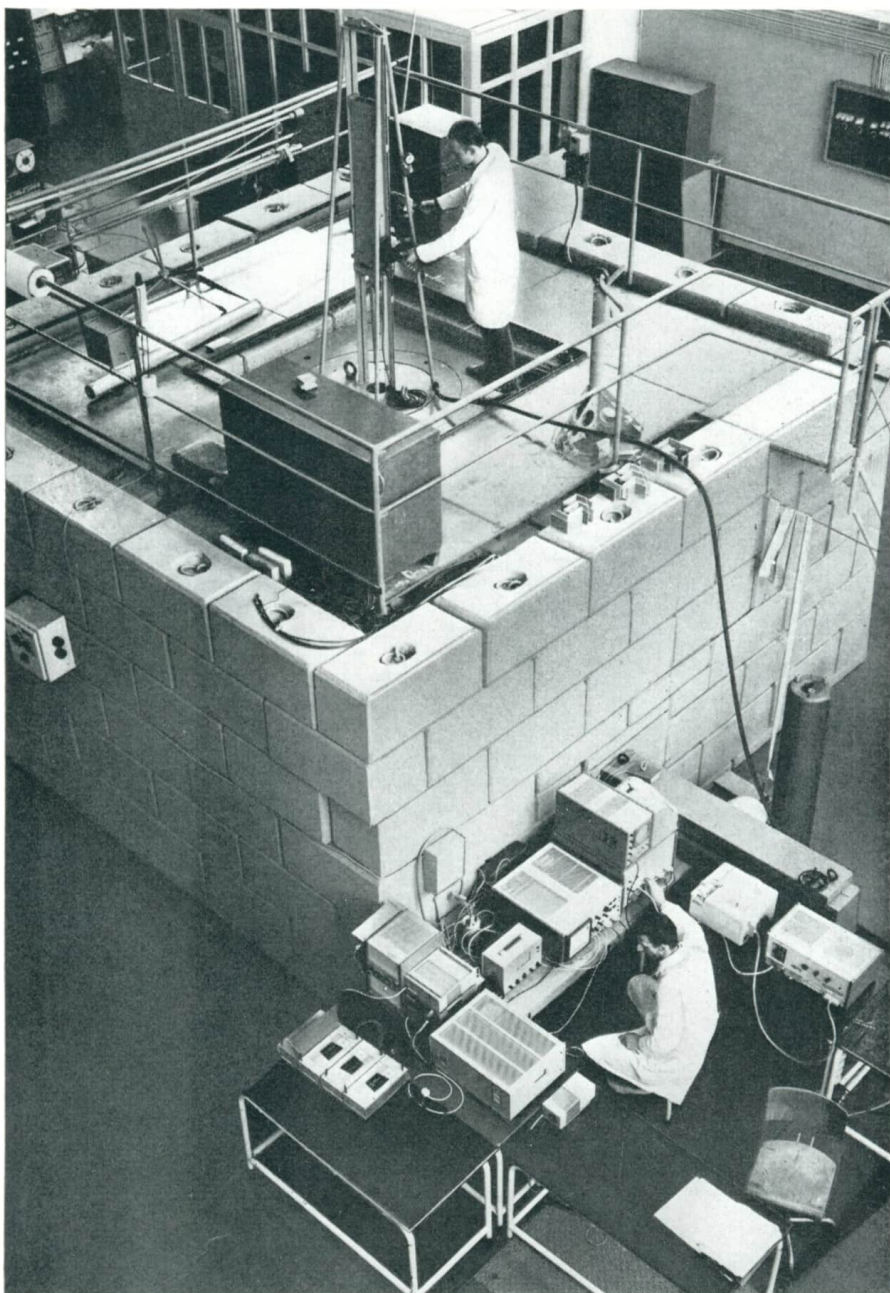
Um eine zweite Angabe zur Bestimmung des Ätherwindes zu bekommen, schlug *Michelson* vor, die ganze Apparatur jeweils um 90° zu drehen, so daß das Licht einmal längs, einmal »quer« zum Ätherwind verlief. Aus der Geschwindigkeitsmessung in »Ätherwindrichtung« und in Richtung quer zum Ätherwind mußte sich die Größe des Ätherwindes bestimmen lassen.

Die experimentelle Ausführung war wegen der zu erwartenden geringfügigen Abweichungen sehr schwierig und störanfällig. Eine Verschiebung der dunklen und hellen Interferenzstreifen um eine Streifenbreite trat ja bereits ein, wenn sich in der Meßanordnung geringste Temperaturdehnungen oder -verkürzungen einstellten, wenn sich die Anordnung nur um geringste Beträge verbog, durch Erschütterungen verformte usw.

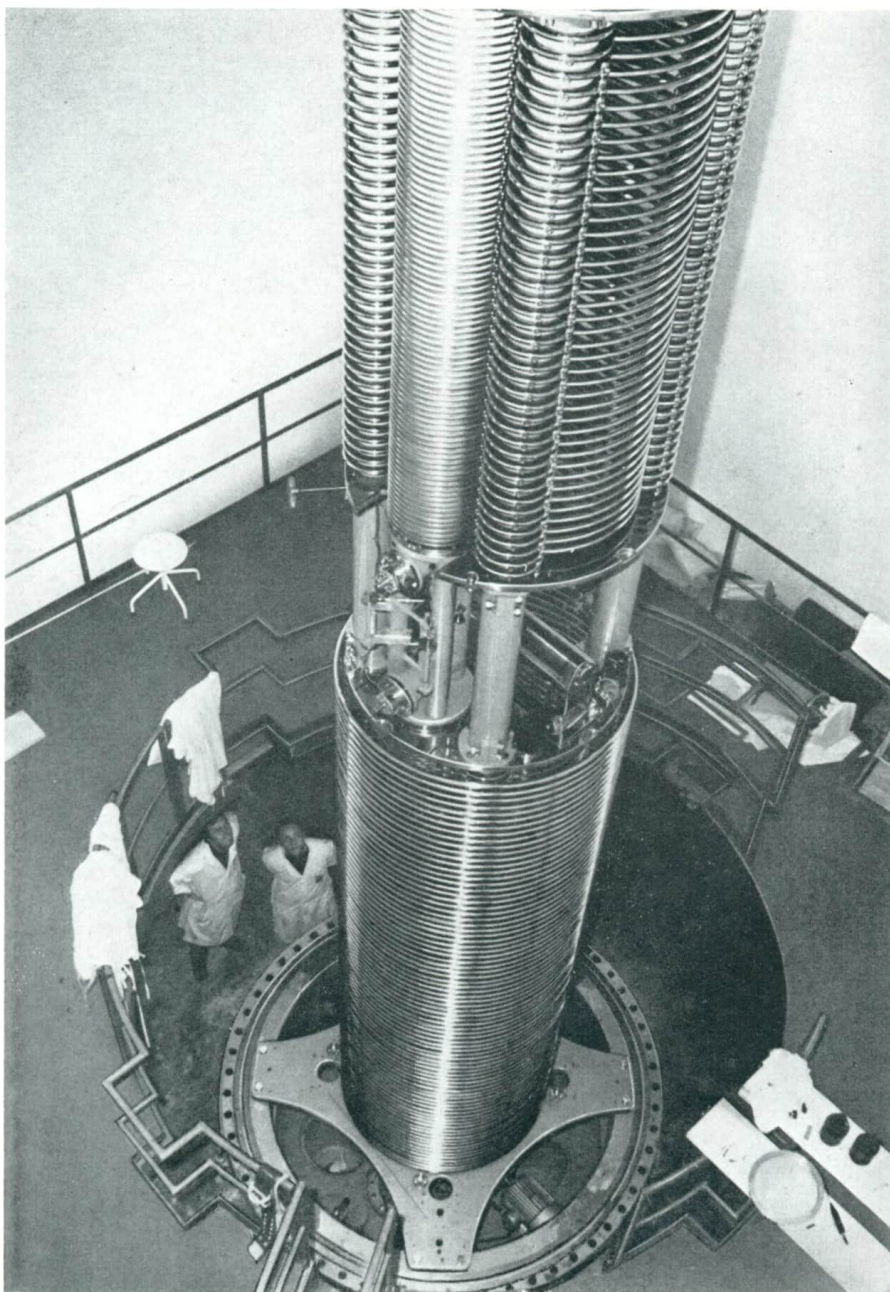
Um deutliche Meßwerte zu erhalten, wäre ein möglichst langer Lichtweg wünschenswert gewesen – doch mit den Abmessungen stiegen auch die Einflüsse der Störeffekte.

Wie empfindlich die Versuchseinrichtung auf äußere Einwirkungen reagierte, zeigt zum Beispiel der erste Versuch, den *Michelson* 1880 in Berlin im Physikalischen Institut der Universität anstellte. Er scheiterte an den Erschütterungen durch den damals gewiß nicht überwältigenden Straßenverkehr. *Michelson* wiederholte daher seine Versuche in Potsdam. Daß er auch dort keinen Geschwindigkeitsunterschied feststellen konnte, führte man darauf zurück, daß der Weg, den das Licht zurückzulegen hatte, nur etwa 1 m betrug, die Anordnung also verhältnismäßig unempfindlich war.

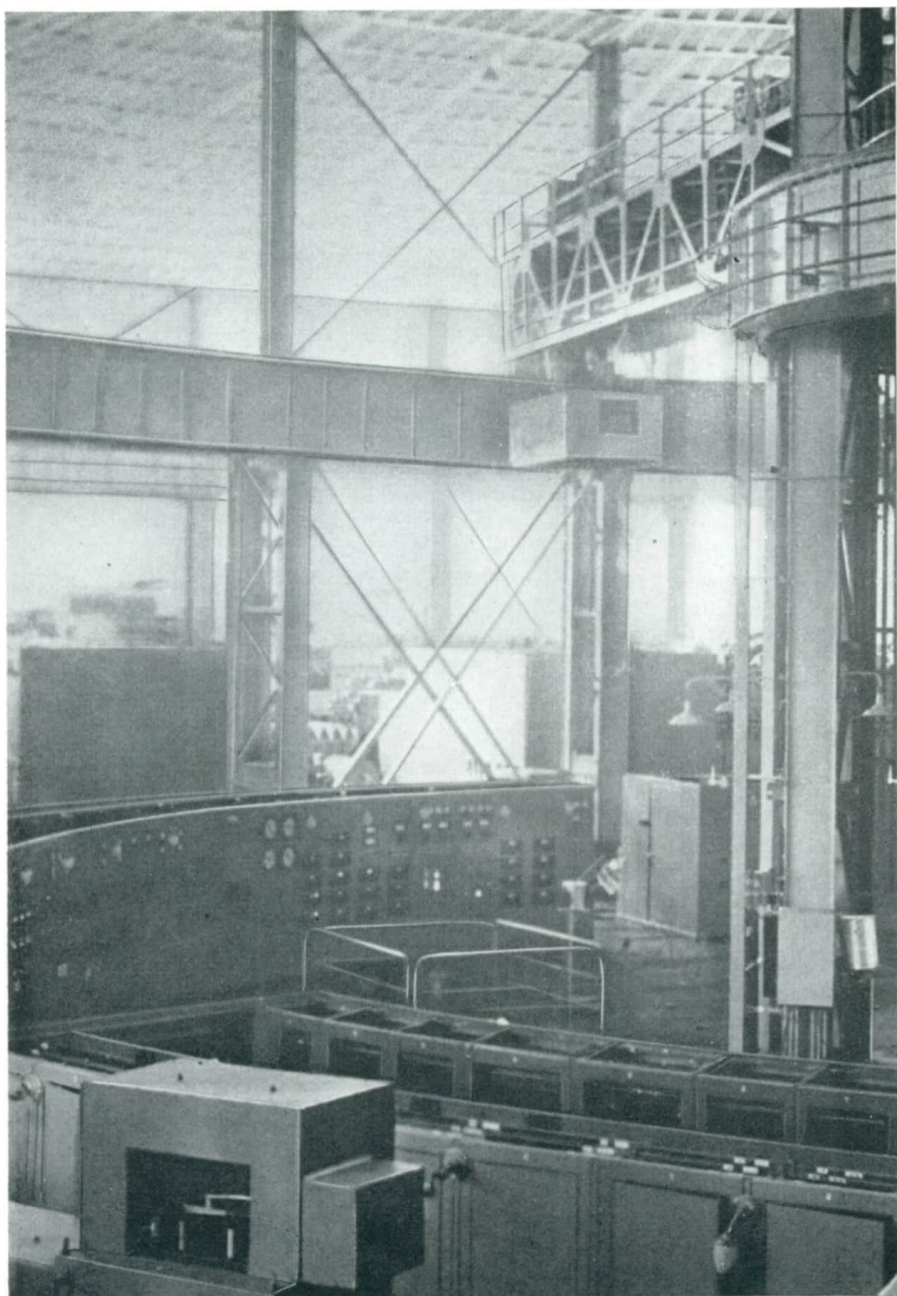
1887 baute *Michelson*, zusammen mit *Morley*, seine Anordnung in den USA erneut auf. Der Lichtweg war durch umlenkende Spiegel gegenüber den Berliner Ver-



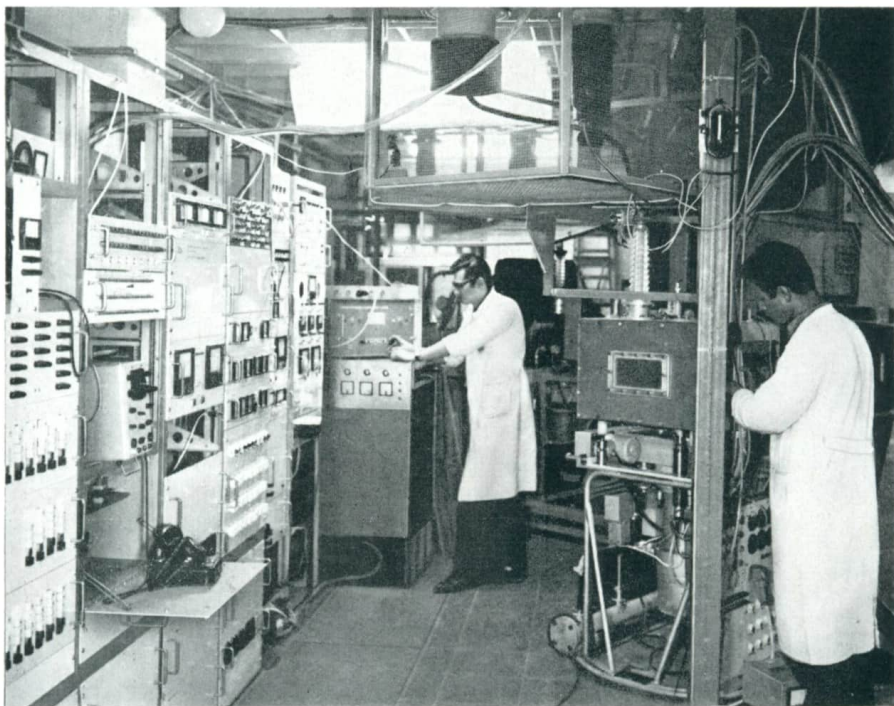
Blick auf den Kernreaktor des Zentralinstituts für Kernforschung Rosendorf. Foto: Bitterlich, Dresden



Beschleunigungssäule eines Tandem-
generators für die Atomforschung.
Foto: Bitterlich, Dresden



Synchrofasotron im Kernforschungs-
institut Dubna. Foto: Nowosti



Blick auf den Kernreaktor eines
Forschungsinstituts der DDR. Foto:
Bitterlich, Dresden

suchen etwa verzehnfacht worden, die ganze Anordnung, um sie möglichst erschütterungsfrei drehen zu können, auf einer Steinplatte montiert, die in Quecksilber schwamm. Auch diesmal war das Resultat negativ; manchmal ergab sich ein Wert für den Ätherwind, manchmal nicht. Niemals aber stimmten die gemessenen Werte auch nur annähernd mit den nach der Theorie zu erwartenden überein.

An diesem negativen Resultat änderte sich auch bei allen Wiederholungen des Versuchs (sie reichen bis in die dreißiger Jahre) nichts, obwohl man die Meßanordnungen stets verfeinerte und Störeinflüsse auszuschalten suchte, zum Beispiel durch Verlängern des Lichtweges, Führung des Lichts in Röhren, aus denen die Luft teilweise entfernt worden war, Montage der ganzen Anordnung auf Quarz, um Temperaturänderungen gering zu halten und Einflüsse des erdmagnetischen Feldes auf ferromagnetische Konstruktionsteile der Anordnung auszuschalten.

Versuche, den Äther auf dem Umweg über bestimmte elektrische Erscheinungen nachzuweisen, blieben ebenfalls erfolglos.

So hätte zum Beispiel ein geladener Kondensator, in bestimmter Weise zur Richtung der Erdbewegung angeordnet, bei Existenz des Äthers ein meßbares Drehmoment erfahren müssen. Auch dieses Drehmoment war nicht festzustellen.

Einen ruhenden Äther also gab es gewiß nicht. Doch mit dem Gedanken, überhaupt auf den Äther zu verzichten, konnte man sich nur schwer anfreunden. Statt dessen suchten viele Forscher nach Gründen für das Scheitern der Michelsonschen Versuche.

Vielleicht, so argumentierte man, wird von der durch den Weltraum rasenden Erdkugel eine mehr oder weniger dicke Ätherschicht mitgerissen? Diese Vorstellung war nicht neu, schon um die Mitte des 19. Jahrhunderts hatte *Fizeau* (s. S. 44) Experimente in dieser Richtung angestellt. Doch einerseits sprachen astronomische Erfahrungen und Tatsachen (z. B. die Aberration, s. S. 43) gegen eine Mitführung des Äthers, zum anderen scheiterten alle Wiederholungen des Michelsonversuchs, bei denen man aus dem Bereich der Mitführung herauszukommen oder wenigstens in Schichten geringerer Mitführung zu gelangen suchte.

Als man den Michelson-Morley-Versuch auf Bergen, zum Beispiel im 1742 m hoch gelegenen Mount-Wilson-Observatorium, wiederholte, ergab sich ein ebenso negatives Resultat wie bei späteren Versuchen in einem auf große Höhe gestiegenen Ballon (1927). Ergebnis blieb in jedem Fall: Auch die Hypothese eines sich mit der Erde bewegenden Äthers war nicht zu halten.

Vielleicht, meinten manche, gibt es aber zufällig eine Ätherströmung in Richtung der Erdbewegung und mit gleicher Geschwindigkeit?

Abgesehen davon, daß eine solche Zufälligkeit jedes schlechten Kriminalromans würdig gewesen wäre: Im Jahresverlauf durchmißt unser Heimatplanet eine Ellipse. Wenn – und das glaubten selbst die standhaftesten Anhänger dieser Hypothese nicht – sich der Äther nicht entsprechend in seiner Strömungsrichtung mitdrehte, müßte die Erdbewegung nacheinander mit, quer und entgegen der Ätherbewegung verlaufen. Infolgedessen müßte der Michelsonversuch, im Laufe eines Jahres mehrfach wiederholt, zu deutlich unterscheidbaren Resultaten führen. Das war nicht der Fall. Auch alle anderen Erklärungsversuche und Hypothesen zum negativen Ausgang des Michelsonschen Experiments vermochten den Äther nicht zu »retten«.

Der Äther, seit Jahrhunderten als existierend angenommen, seit Jahrzehnten experimentell gesucht, widerlegte sich selbst: Er befand sich weder in Ruhe, noch bewegte er sich. Seine Annahme war nicht damit zu vereinbaren, daß die Geschwindigkeit des Lichts wie der elektromagnetischen Wellen überhaupt unabhängig davon war, ob der Beobachter, der sie auffing, sich bewegte oder nicht, ob die Quelle der Wellen sich in Ruhe oder Bewegung befand.

Konnte, mußte man endgültig auf den Äther verzichten? Gab es Möglichkeiten, die physikalischen Gesetzmäßigkeiten ohne die Ätherhypothese auszudrücken und zu verstehen? Konnte man die aufgetretenen oder nur scheinbaren Widersprüche vereinen?

Ein Physiker unserer Zeit, *Albert Einstein* (1879 bis 1955), wagte es, im ersten Jahrzehnt unseres Jahrhunderts radikal mit den herkömmlichen Ansichten und Hypothesen zu brechen. Die von ihm entwickelte spezielle Relativitätstheorie, heute unentbehrlicher Baustein im Fundament der Physik, hatte Konsequenzen, deren eine wir auf den folgenden Seiten kennenlernen werden.

W

Lawine der Kleinsten

Wer immer Gelegenheit hat, ein Kernforschungszentrum zu besichtigen, wird mit einer auffälligen und zunächst überraschenden Beobachtung konfrontiert: Die Beschäftigung mit den kleinsten Repräsentanten der Materie, den Atomen und den Elementarteilchen, hat zu immer umfangreicheren und aufwendigeren Instrumentarien und Anlagen geführt, zu Instrumentarien, die in der Zeit um 1900 selbst Atomphysikern noch utopisch erschienen wären, zu Anlagen, deren Errichtung und Betrieb die Möglichkeiten eines Landes oft überschreiten.

Wo einst Teilchen, auf dem Laboratoriumstisch von winzigen Körnchen radioaktiver Substanzen ausgeschleudert, zu revolutionären Schlußfolgerungen führten, begegnen uns heute Anlagen von der Größe einer Turnhalle oder eines Stadions. In ihnen werden als atomare Geschosse dienende Teilchen durch elektrische und magnetische Felder beschleunigt, zu deren Erzeugung ebensoviel Elektroenergie benötigt wird wie zur Versorgung einer Großstadt.

Wo anfänglich eine Stanniolhülle genügte, Strahlen abzuschirmen, finden wir heute Bleibarren und meterdicke Wände als Strahlenschutz.

Die Zeit der – früher oft spöttisch zitierten – »Bindfaden- und Siegelackphysik« ist lange vorüber. Noch *Thomson, Röntgen, Heinrich Hertz* hatten ihre Apparaturen selbst gebaut oder von geschickten Laboratoriumsmechanikern anfertigen lassen. Der Physiker von heute stützt sich auf Kollektive von Spezialisten und die Ausrüstung einer hochentwickelten und leistungsfähigen Technik – nur sie können die von ihm benötigten »Instrumente« bereitstellen. Damit zugleich aber gibt die Technik zurück, was sie von der Physik empfing; denn viele ihrer wichtigsten Zweige – denken wir nur an Elektronik, Elektrotechnik, Hochvakuumtechnik, Prüf- und Meßverfahren – wurden in physikalischen Laboratorien angeregt und begründet. Dieser Aufwand muß sein, soll der Atomkern, sicherlich einschneidendstes Forschungsthema unseres Jahrhunderts, seine Geheimnisse lüften. Wie wichtig die Preisgabe dieser Geheimnisse ist, hat, wie kein Wissenszweig zuvor, die Erschließung der Kernenergie offenbart – im Guten wie im Bösen: Sie kann, zum Nutzen der Menschheit angewandt, entscheidend beitragen, zum Beispiel auch das immer mehr drängende Problem des »chronischen Energiemangels« zu lösen. Von verbrecherischen Kräften mißbraucht, könnte sie das Leben auf unserem Planeten ausrotten.

Die Völker wählten und erzwingen den ersten, den friedlichen Weg. In immer kürzeren Abständen nehmen neue Kernkraftwerke ihren Betrieb auf, entstehen Pläne, für weitere, leistungsfähigere.

Die Geräte, mit denen diese Entwicklung begann, fanden auf einem einfachen Tisch Platz.

Nach der Entdeckung radioaktiver Stoffe stellten sich zwei wichtige Fragen: Das Atom war, das zeigte jedes Funkeln im Spinthariskop (Gerät zum Nachweis von α -Teilchen), kein unveränderliches, homogenes und starres »Kügelchen«. Es hatte sich im Gegenteil als höchst »lebendig« und kompliziert erwiesen, so lebendig und kompliziert, daß es nur begreifbar wurde, wenn man – viele Physiker taten es, ohne sich dessen bewußt zu werden – auf seine Erforschung materialistisch-dialektische Betrachtungsweisen anwandte.

Wie aber »sah dieses Atom aus«, wie war es zusammengesetzt? Woher stammte die beim radioaktiven Zerfall freiwerdende Energie?

Beide Fragen wurden gleichzeitig und miteinander beantwortet. Wir wollen uns zunächst der ersten zuwenden.

Atom»modelle« entstanden, wurden korrigiert, wieder verworfen, weil sie manche Erscheinung erklären konnten, bei anderen jedoch versagten oder zu unlösbaren Widersprüchen führten. *Rutherford* entwarf, angeregt vor allem durch die Resultate der Experimente über den Beschuß von Atomen mit Alphateilchen, sein berühmtes Planetenmodell.

Es veranschaulicht das Atom als extreme Verkleinerung eines Planetensystems, mit einer im Zentrum stehenden »Sonne«, dem positiv elektrischen Atomkern, und ihn umkreisenden »Planeten«, den sich auf bestimmten Bahnen bewegendenden Elektronen. Ein einfaches, bildhaftes, aber nicht widerspruchsfreies Modell. Schon wenige Jahre später mußte es weitgehend abgeändert werden.

Niels Bohr (1885 bis 1962), der berühmteste dänische Physiker, verknüpfte das Planetenmodell mit Überlegungen und Hypothesen, die vor allem auf *Albert Einstein* (1879 bis 1955) und *Max Planck* (1858 bis 1947) zurückgehen. Dadurch konnte es weitere wichtige Fragen beantworten helfen, wie etwa die nach der Entstehung der Spektren.

Daß auch dieses Modell eben »nur ein Modell« war und nicht die ganze Realität widerspiegeln konnte, sollte sich in den Jahren und Jahrzehnten danach immer wieder zeigen. Dieser Prozeß der Erkenntnisgewinnung ist heute noch keineswegs abgeschlossen.

Hinweise zur Beantwortung der zweiten Frage, der nach der Energie, ergaben sich, wie so oft in der Physik, aus Messungen. Radioaktive Präparate waren stets etwas wärmer als ihre Umgebung. Hier setzte man an und maß die freigesetzte Energie. *Pierre Curie* nahm sich das Radium vor. 586 Joule würde, so ergab sich, jedes Gramm Radium in der Stunde entwickeln. Das ist wenig, weniger Wärme, als eine Zigarette beim Verbrennen abgibt, aber diese Energie wird Stunde um Stunde, Jahr für Jahr abgegeben. Selbst wenn man die Halbwertszeit und das durch sie bedingte Sinken der Strahlungsintensität berücksichtigt, ergeben sich Energiebeträge, denen gegenüber die Energie, die durch Verbrennen gleicher Stoffmengen fester Brennstoffe gewonnen werden kann, nahezu vernachlässigbar ist; setzt doch 1 g Radium während seiner Umwandlungen bis zum Blei rund 4000 kWh frei.

Sobald das bekannt wurde, begann der »Radiummotor« durch die Spalten der Tagespresse zu geistern. Einige Kilogramm des unheimlichen Stoffes, so glaubten und schrieben manche, müßten, auf engem Raum konzentriert, eine geradezu ideale Kraftquelle für stationäre Maschinen, für Schiffe und Fahrzeuge sein.

Selbstverständlich konnte aus diesen Projekten nichts werden. Die »wenigen Kilo Radium« waren auf der ganzen Welt nicht verfügbar. Auch hätte keine Möglichkeit bestanden, ihre intensive Strahlung mit technisch vertretbaren Mitteln abzusichern; und schließlich entzog sich diese Energiequelle jeder Dosierung oder Regelung. Der »Radiummotor« hätte stets die volle Leistung abgeben müssen, gleich, ob diese gerade benötigt wurde oder nicht; im Leerlauf hätte man den Überschuß vernichten, etwa durch Kühlung abführen müssen.

Physiker ließen sich durch die imponierenden Zahlen nicht blenden. Doch waren sie ein bestimmender Anreiz zur Suche nach der Quelle dieser Energie. Dabei halfen den Forschern vor allem die Arbeiten *Einsteins*, der zwei der grundlegendsten und weitestreichenden Naturgesetze in seine Betrachtungen und Überlegungen einbezog und ihre Zusammenhänge aufdeckte.

Der Chemiker war von der Erhaltung der Masse überzeugt. Der Physiker griff immer wieder auf das Gesetz von der Erhaltung und Umwandlung der Energie zurück (s. S. 75) – »Verluste« oder »Gewinne« waren, wie beim Gesetz von der Erhaltung der Masse, auch hier ausgeschlossen. Beide Erhaltungssätze schienen unabhängig voneinander zu existieren und nichts miteinander zu tun zu haben.

Gerade an dieser Stelle setzt *Einstein* mit seinen Überlegungen und Schlußfolgerungen ein und wagt eine sehr kühne Behauptung:

Zwischen den Erscheinungsformen Masse und Energie der Materie gibt es sehr wohl Wechselbeziehungen. Jede Massenänderung ist mit einer Energieänderung, jede Energieänderung mit einer Massenänderung verknüpft. Die Einsteinsche Formel $W = mc^2$, worin W die Energie, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit bedeuten, drückt das aus und läßt erkennen, daß schon geringsten Massenänderungen sehr große Energieänderungen entsprechen. Bereits eine Massenabnahme von 1 g bedeutet, daß eine Energie von 25 Millionen kWh frei wird.

Lag hierin vielleicht das Geheimnis des in den Atomen verborgenen gewaltigen Energievorrats, der sich bei der radioaktiven Strahlung offenbarte? Traten in den Atomen Massenänderungen auf, so winzig, daß sie sich bisher der Feststellung entzogen hatten, aber nach der Einsteinschen Formel trotzdem große Energiemengen ergaben?

Einstein vermutete es. Beweisen konnte er seine Hypothese nicht. So schrieb er vorsichtig und zugleich vorausschauend:

»Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren Energieinhalt in hohem Maße veränderlich ist, (zum Beispiel bei den Radiumsalzen), eine Prüfung der Theorie gelingen wird.«

Heute besteht jeder Kernreaktor, jedes Kernkraftwerk diese »Prüfung«. Doch damals mußte sich *Einstein* herbe Kritik gefallen lassen, obwohl manche Kollegen bereits vor ihm auf die Möglichkeit von Wechselwirkungen zwischen Masse und Energie hingewiesen hatten. Es gab sogar experimentelle Anhaltspunkte.

Um die Jahrhundertwende hatte man entdeckt, daß mit der spezifischen Ladung schnell fliegender Elektronen »etwas nicht stimmte«. Sie folgten im Magnetfeld nicht genau der Bahn, die ihnen die Theorie vorschrieb; die Abweichung wuchs mit der Geschwindigkeit. Das zu erklären, war nur unter der Annahme möglich, daß die Elektronenmasse zugenommen hatte.

Aber hing denn die Masse eines Körpers von seiner Geschwindigkeit ab? Derarti-

ges war anderweitig noch nie beobachtet worden und mit den Vorstellungen der Newtonschen Mechanik unvereinbar.

Für *Einstein* hingegen war eine Massenzunahme mit der Geschwindigkeit nicht nur vorstellbar, sondern zwingend notwendig. Daß man sie bisher stets übersehen hatte, lag daran, daß die Massenänderungen erst bei extrem hohen Geschwindigkeiten meßbare Beträge erreichen.

Einsteins Voraussage über die mögliche Quelle der radioaktiven Strahlung bestätigte sich ebenfalls. In der Tat sind es Massenänderungen, auf denen die in den Atomkernen verborgenen Energien beruhen.

Als man genauere Vorstellungen vom Aufbau der Atomkerne aus Protonen und Neutronen hatte, also man die »persönlichen Daten« dieser Bausteine mit immer größerer Genauigkeit gemessen hatte, zeigte sich:

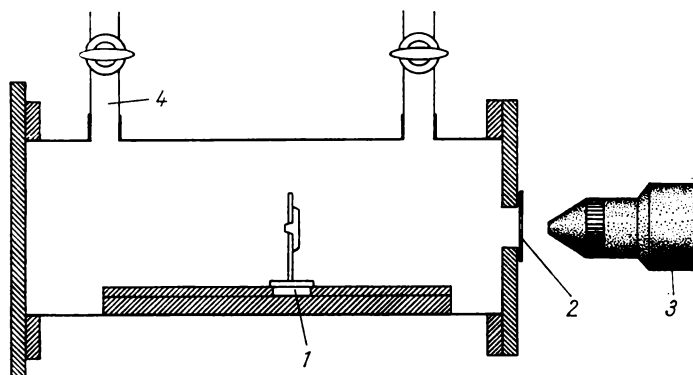
Die Masse des Atomkerns ist nicht, wie zu erwarten wäre, genau gleich der Summe der Massen der einzelnen Bausteine, sondern stets etwas geringer. Dieser Massedefekt entspricht derjenigen Energie, die bei der Bildung der Atomkerne aus ihren Bausteinen freigesetzt wird. Zwingt man zum Beispiel zwei Protonen – die Atomkerne des Wasserstoffs – und zwei Neutronen zu einem Heliumkern zusammen, wird eine relativ große Energiemenge freigesetzt. Diesem Vorgang verdanken wir im Prinzip die Sonnenwärme, auf ihn gehen die Wasserstoffbombe zurück und auch das »Kernverschmelzungskraftwerk«, an dessen künftiger Verwirklichung Physiker in vielen Ländern arbeiten.

Infolge des Massedefekts wird nicht nur Energie freigesetzt, wenn wenige atomare Bausteine zu leichten Atomkernen verschmolzen werden. Auch bei der Spaltung schwerer Atomkerne, zum Beispiel derjenigen des Urans, werden erhebliche Energiebeträge frei. Ihnen verdanken wir alle gegenwärtig arbeitenden Kernkraftwerke.

Bleiben wir vorerst noch in der Zeit nach dem Ende des ersten Weltkrieges. *Rutherford* hatte, wie fast alle Physiker, seine Arbeiten unterbrechen und sich mit der Entwicklung neuer Vernichtungsmittel beziehungsweise ihrer Abwehr beschäftigen müssen. Nun endlich konnte er seine Forschungen wieder aufnehmen.

Man meinte inzwischen sicher sein zu können, daß alle Atomkerne aus Protonen zusammengesetzt seien, die jedoch teilweise durch Kernelektronen neutralisiert würden. (Wie sich später herausstellen sollte, was das ein Trugschluß.) Diese Annahme war notwendig geworden, um Ladungsgleichgewicht zwischen dem Atomkern und den ihn umkreisenden Elektronen herzustellen. Einmal mußte jedes Elektron der »Elektronenhülle« durch ein positives Kernteilchen gewissermaßen festgehalten werden, andererseits hatte sich ergeben, daß die Zahl der Kernteilchen größer ist als die Zahl der Elektronen in der Hülle. Also mußten, wenn man im Kern nicht außer Protonen unelektrische Teilchen annehmen wollte, Protonenladungen durch Kernelektronen kompensiert werden.

Die Kerne radioaktiver Substanzen zerfielen – von allein, von außen unbeeinflussbar, nach einem bekannten Gesetz. Die Atomkerne der weitaus meisten Grundstoffe aber, obschon ebenfalls aus Elementarteilchen aufgebaut, zeigten sich stabil. Waren sie aber auch unangreifbar? Oder gab es – im Gegensatz zu radioaktiven Stoffen – vielleicht Möglichkeiten, an sie von außen heranzukommen, etwa Teile des Atomkerns abzusprengen oder diesen gar zu zertrümmern?



Rutherford's Apparatur zur Beobachtung von Kernumwandlungen
 1 verschiebbares radioaktives Präparat; 2 Fluoreszenzschirm; 3 Beobachtungsmikroskop; 4 Luft- bzw. Gaseintritt und Gasaustritt

Wie aber sollte das Werkzeug beschaffen sein, mit dem man Atomkernen beikommen konnte? *Rutherford* hatte es schon benutzt, wenngleich zu einem anderen Zweck. Er hatte Stoffe mit Alphateilchen beschossen und die Ablenkung der Teilchen untersucht. Immer waren bei seinen Versuchen einige Alphateilchen ganz erheblich abgelenkt worden, und *Rutherford* hatte daraus richtig geschlossen, daß solche Teilchen ganz dicht an einen Atomkern herangekommen und vor dessen abstoßenden Kräften gewissermaßen zurückgeprallt waren.

Sollte es nicht gelingen, diese letzte Wand zu durchbrechen und Alphateilchen nicht nur an, sondern in Atomkerne gelangen zu lassen?

Wieder benutzte *Rutherford* eine beinahe anmutende Versuchseinrichtung. Als Geschütz diente ein radioaktives Präparat, als Ziel zunächst Luft. Die Alphateilchen wurden wie üblich an Hand der winzigen Lichtblitze, der Szintillationen, identifiziert, die sie auf einem Fluoreszenzschirm hervorriefen. Solange die Entfernung zwischen Schirm und Präparat sehr gering blieb, verlief alles normal. Das tausendfältige Funkeln zeigte den Geschosshagel an, *Rutherford* vergrößerte die Entfernung. Wie zu erwarten war, hörte bei einer Distanz von rund 7 cm das Funkeln auf; sie entsprach der Flugweite der Alphateilchen.

Doch gab es wirklich keine Szintillationen in größerer Entfernung? Ergebnis genauer Beobachtungen war: Es traten, wenn auch schwächer und in viel geringerer Zahl, Szintillationen bis zu mehreren Dezimetern Distanz auf. Sie konnten nicht von Alphateilchen hervorgerufen sein.

Die naheliegende Annahme, es könne sich hier um eine bisher unentdeckt gebliebene, vom radioaktiven Präparat ausgehende Strahlung handeln, schied aus. Man hätte sie bei den jahrelangen Versuchen mit radioaktiven Präparaten sicherlich nicht übersehen. Hingen die Szintillationen vielleicht mit der Luft zusammen, die die Alphateilchen abbremste?

Die Versuche wurden mit anderen Gasen, dann wieder mit Luft, schließlich mit ihren Bestandteilen, wiederholt. In reinem Sauerstoff traten keine, in Stickstoff dagegen verstärkt Szintillationen auf.

Demnach war Stickstoff am Entstehen der Szintillationen unmittelbar beteiligt. Unklar blieb zunächst, wie und was für Teilchen oder Strahlen überhaupt von den Stickstoffatomen ausgingen. Um das festzustellen, griff man zu der seit Jahren bewährten Methode. Die unbekannte Strahlung wurde durch elektrische und ma-

agnetische Felder geschickt, ihre Ablenkung gemessen. Die Auswertung ergab: Die winzigen Lichtblitze wurden zweifellos durch Protonen, durch Atomkerne des Wasserstoffs, hervorgerufen.

Zwei Möglichkeiten bestanden, die Herkunft der Wasserstoffkerne zu erklären. Entweder hatte sie der Stickstoff bereits als Verunreinigung enthalten, oder der Wasserstoff war erst beim Versuch entstanden. Bestätigte sich die zweite Möglichkeit, mußte dies eine physikalische Entdeckung ersten Ranges sein, hieß das doch nichts anderes, als daß das Ziel, Veränderungen des Atomkerns willkürlich von außen herbeizuführen, nicht mehr unerreichbar war.

Prüfen, untersuchen, jede Fehlermöglichkeit ausschließen: Die Bedeutung des kaum sichtbaren Blitzens rechtfertigte alle Vorarbeiten, die weit langwieriger waren als die eigentlichen Versuche. Gase mußten mit allen nur bekannten Kunstgriffen gereinigt, die Versuchsgeräte von geringsten Fremdstoffspuren befreit werden.

Erneute Experimente mit den verbesserten Apparaturen bestätigten: Protonen waren nicht etwa zufällig in die Versuchsapparatur geraten. Sie entstanden fortwährend neu, solange das Bombardement mit Alphateilchen anhielt.

Rutherford und seine Mitarbeiter gaben folgende Deutung des Vorgangs: Von den Tausenden und aber Tausenden Alphateilchen, die in Stickstoff (oder auch in Luft) eindringen, werden zwar die meisten, wenn sie einem Atom nahekommen, nur abgelenkt. Einige wenige jedoch – eines unter vielen Tausenden – erzielen einen Volltreffer und zerschlagen ein Stickstoffatom. Zu den explosionsartig auseinanderfliegenden Bruchstücken gehören auch die beobachteten Protonen.

Was dabei im einzelnen vorging, ob, wie beim radioaktiven Zerfall, Energie freigesetzt wurde, welches Schicksal Alphateilchen und die anderen Explosionstrümmer nach einem Treffer erlitten, blieb vorerst noch in Dunkel gehüllt. Überhaupt waren sich *Rutherford* und seine Mitarbeiter darüber im klaren, daß die Lichtblitze auf dem Fluoreszenzschirm nicht das Ende, sondern den Beginn eines langen Weges markierten. Doch so beschwerlich er auch sein mochte, er würde, gegründet auf die Gewißheit, daß der Mensch in den Atomkern eingreifen konnte, weit in noch unerschlossenes Land führen.

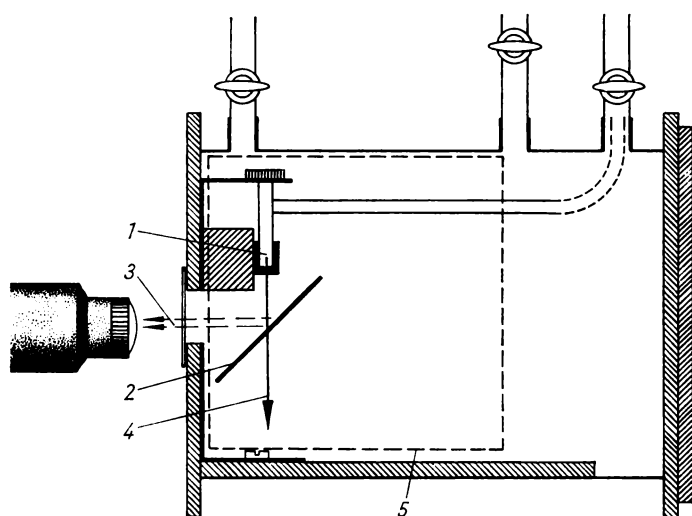
Wenn mit Hilfe von Alphateilchen aus Stickstoff Wasserstoff »herausgelöst« werden konnte – was passierte, wenn man andere chemische Grundstoffe beschoß?

Es gab kaum ein Element, das in der Folgezeit nicht als Zielscheibe für Alphateilchen herhalten mußte. Bei manchen Grundstoffen, zum Beispiel bei Bor, Aluminium, Phosphor, traten Szintillationen auf – Zeichen dafür, daß Atomkerne zumindest angeschlagen worden waren und Teilchen abgegeben hatten; bei anderen gab es keinerlei Anzeichen für eine Umwandlung.

Vielleicht aber waren diese Mißerfolge nur scheinbar; denn bei Stickstoff und den anschließend untersuchten Elementen hatte man die Protonen nur entdeckt, weil sie auf Grund ihrer Energie viel weiter als Alphateilchen flogen. Wenn jedoch Protonen frei wurden, deren Reichweite die der Alphateilchen nicht oder nur wenig überschritt, wäre zunächst nicht auszumachen, welche Szintillationen von Alphateilchen und welche von Protonen herrührten.

Man mußte eine Möglichkeit finden, Alphateilchen und Protonen bereits frühzeitig, auf alle Fälle vor Erreichen des Beobachtungsschirms, voneinander zu trennen.

Das gelang, indem man den zu untersuchenden Stoff, Alphastrahlenquelle und



Variante der Rutherford'schen Versuchsanordnung

1 α -Strahlenquelle; 2 Platte mit zu untersuchender Substanz; 3 Weg der Protonen; 4 Weg der α -Teilchen; 5 Abschirmung

Szintillationsschirm nicht mehr in gerader Linie, sondern so im Winkel zueinander anordnete, daß die Alphateilchen zwar das zu untersuchende Material, nicht aber den Beobachtungsschirm treffen konnten.

Mit dieser Abänderung stellten sich weitere Erfolge ein. Zwar gelang es nicht, bei allen Elementen Kernumwandlungen zu erzielen (besonders die Atomkerne schwerer Elemente widersetzen sich hartnäckig), aber immerhin verlängerte sich die Liste der umgewandelten Elemente zum Beispiel um Neon, Silicium, Schwefel und Kalium.

Gab es hier prinzipielle Hindernisse, oder lagen die Mißerfolge bei den übrigen Elementen vielleicht daran, daß ihre Kerne zu fest zusammenhielten und die Alphateilchen zu heftig abstießen?

Um das nachzuprüfen, brauchte man durchschlagendere Geschosse als die von den seltenen und teuren radioaktiven Stoffen ausgehenden. Auch mußte der Geschosshagel dichter werden; denn bisher hatte man stets nur die seltenen Einzeltreffer, Zufallstreffer gewissermaßen, beobachten können. Das reichte auf die Dauer für weitere systematische Forschungen nicht aus.

Allerdings vergingen noch Jahre, ehe man radioaktive Strahlen durch weittragende »Teilchenkanonen« hoher Durchschlagskraft und Feuergeschwindigkeit ersetzen konnte, wie sie durch die modernen Beschleuniger und ihre alle gewohnten Laboratoriumsmaßstäbe überschreitenden Anlagen zur Verfügung stehen.

Zu Beginn der zwanziger Jahre mußte man sich noch mit radioaktiven Präparaten als Strahlenquelle begnügen. Immerhin gab es außer der Zertrümmerung weiterer Atomkerne noch zahlreiche Probleme, zu deren Lösung die wenigen Zufallstreffer ausreichten.

Besonders ein Instrument, das in vielfacher Abwandlung und Verbesserung auch heute noch unentbehrlich ist, half dabei: die nach ihrem Erfinder, dem Physiker *Charles Thomson Rees Wilson* (1869 bis 1959) benannte Expansions-Nebelkammer.

In ihr rufen geladene Teilchen Perlenketten von Wassertropfchen, winzige Kondensstreifen geladener Teilchen hervor. So wird die Spur, die ein einzelnes Teilchen hinterläßt, sichtbar und kann fotografisch registriert werden. Man kann verfolgen, wie es durch elektrische oder magnetische Felder abgelenkt wird oder mit anderen Atomen in Wechselwirkung tritt, zum Beispiel von den abstoßenden Kräften eines nahen Atomkerns zur Seite gestoßen wird.

Würde man an Hand der Teilchenspuren in der Nebelkammer hinter die Einzelheiten der noch immer nicht restlos erklärten Kernzertrümmerung kommen?

1925 wandte sich vor allem der englische Physiker *Patrick Maynard Stuart Blackett* (1897 bis 1974) diesem Problem zu. Er wußte, welche mühsame und langwierige Arbeit auf ihn zukam. Bei der Seltenheit von Kerntreffern würde es vieler Hunderter oder Tausender Aufnahmen bedürfen, ehe auch nur ein Zusammenstoß zwischen Alphateilchen und Atomkern auf Platte oder Film gebannt werden konnte.

Um wochenlanges, eintöniges Wiederholen ständig gleicher Arbeitsgänge zu umgehen, konstruiert *Blackett* eine Nebelkammer, die dieses Programm selbsttätig erledigt, Aufnahme um Aufnahme, vier in jeder Minute, Hunderte, Tausende im Verlauf von Tagen.

Trotzdem bleibt noch mehr als genug zu tun. Über 23 000 Aufnahmen sind schließlich von *Blackett* und seinen Helfern zu entwickeln und Stück für Stück mit konzentrierter Aufmerksamkeit zu durchmustern – immer im Hinblick auf eine Frage: Befinden sich unter den einander ähnlichen zahlreichen Alphateilchenspuren (eine halbe Million etwa sind es insgesamt) auch solche, die Zeugnis von einem Kerntreffer ablegen?

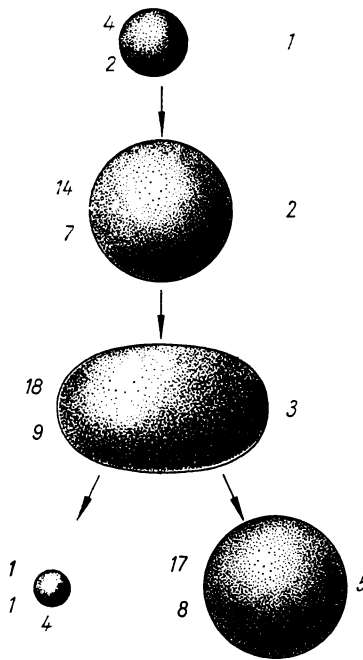
Hunderte von Aufnahmen haben *Blackett* und seine Mitarbeiter schon durchgesehen – nichts. Stets nur zeigen sich die Spuren von Alphateilchen, die entweder geradeaus flogen oder, wenn sie einem Atomkern zu nahe kamen, aus ihrer Bahn geworfen wurden – dabei das ablenkende Atom gleichfalls zur Seite stoßend (ähnlich wie ein schwungvoll geworfener Tennisball einen stillliegenden Fußball).

Dann aber zwingt eine Aufnahme zu noch sorgfältigerer Betrachtung. Die Spur eines Alphateilchens gabelt sich: kurz und kräftig der eine Zweig; langgestreckt und viel schwächer der andere. Siebenmal noch, nur wenig in der Form, nicht aber in der Art abgewandelt, wiederholt sich dieses Bild bei der Durchsicht der übrigen Platten.

Die Spur des Alphateilchens, des Geschosses, ging hier nicht, wie bei einer großen Ablenkung, weiter, sondern hörte im Scheitelpunkt der Gabelung auf. Die dünne, langgestreckte Spur war nicht neu. Sie gehörte, wie man aus zahlreichen anderen Versuchen wußte, zu einem Proton. Die kurze, dicke Spur mußte dann dem getroffenen Atomkern zugesprochen werden, der durch die Wucht des Zusammenpralls zur Seite geschleudert worden war. Unter rund 500 000 Alphateilchenspuren fotografierte man ganze acht Kerntreffer!

Die Aufnahmen zwangen zunächst zu einer Wortkorrektur. Von einer explosionsartigen Zertrümmerung des Atomkerns konnte nicht mehr die Rede sein. Der Stickstoffkern war durch das Alphateilchen nicht auseinandergesprengt worden – im Gegenteil, er hatte es verschluckt und dafür einen Wasserstoffkern ausgestoßen.

Der Stickstoffkern war also nicht zertrümmert, sondern umgewandelt worden. Die



Rutherford wandelt Stickstoff in Sauerstoff um. (Die Zahlen links oben geben die relativen Atommassen, die Zahlen links unten die Protonenzahl an.)

- 1 α -Teilchen;
- 2 Stickstoffkern;
- 3 sehr kurzlebiger Zwischenkern;
- 4 Proton;
- 5 Sauerstoffkern

Zahl seiner Kernladungen, entscheidend für die Stellung im Periodensystem und für die Natur des chemischen Elements, nahm durch das eindringende Alpha-Teilchen um 2 zu und wurde durch das entweichende Proton um 1 vermindert. Ein Atom mit der Kernladungszahl 8 blieb übrig, das heißt, aus dem Stickstoffatom war ein Sauerstoffatom geworden, allerdings ein Sauerstoffisotop, dessen relative Atommasse 17 und nicht 16 wie beim »normalen« Sauerstoff betrug.

In der Folgezeit konnten nicht nur weitere Kernumwandlungen beobachtet werden, auch über die Energiebilanz erhielt man, unter anderem durch Ausmessen von Teilchenspuren in der Nebelkammer, Auskünfte, indem man die Länge und die Krümmung in ablenkenden Feldern bekannter Stärke und andere Daten maß.

Die Ergebnisse waren unterschiedlich. Manchmal, zum Beispiel bei der »klassischen« Umwandlung von Stickstoff in Sauerstoff, war die durch das als Geschöß dienende Alphateilchen aufzubringende Energie größer als die Summe aus der Energie des wegfliegenden Protons und der des zur Seite gestoßenen Atomkerns. In anderen Fällen, zum Beispiel bei der Umwandlung eines Aluminiumkerns in einen Siliciumkern, wurde insgesamt eine weit größere Energie ausgelöst als durch das stoßende Alphateilchen aufgebracht. Es gab, wie man es auch von chemischen Vorgängen kannte, energieverzehrende und energieliefernde Kernreaktionen, beide erklärbar durch die Einsteinsche Formel und vor allem verständlicherweise als energieliefernde Kernreaktion interessant.

Die Nebelkammer bestätigte, was man bereits vermutet und schließlich kaum noch angezweifelt hatte. Die Energie der Alphateilchen, wie sie von natürlichen radioaktiven Stoffen bereitwilligst abgegeben wurde, reichte nicht aus, alle Atomkerne umzuwandeln.

Hier kommen wir nicht ohne eine kurze Zwischenbemerkung aus. Gebräuchlichste Energieeinheit im Bereich der Atomphysik ist das Elektronenvolt (eV), die kinetische Energie, die ein Elektron erlangt, wenn man es im elektrischen Feld durch eine Spannung von 1 eV beschleunigt (es hat dann am Ende der Beschleunigungsstrecke immerhin eine Geschwindigkeit von 600 km/s erreicht). Verglichen mit in der Technik üblichen Energiebeträgen ist die Energie 1 eV winzig – man muß sie mit einem Faktor von rund $2,25 \cdot 10^{25}$ multiplizieren, um auf eine Kilowattstunde zu kommen. Doch einerseits sind an den meisten atomaren Vorgängen zahllose elektrisch geladene Teilchen beteiligt, zum anderen bewirkt jede Verdopplung der Spannung, jede Verdreifachung eine Verdopplung bzw. Verdreifachung der Energie.

Alphateilchen, wie sie von radioaktiven Präparaten abgegeben werden, erreichen einige Millionen Elektronenvolt – tausendmal mehr, als zum Beispiel die Elektronen, denen wir das Bild auf den Schirmen unserer Fernsehempfänger verdanken. Doch diese Millionen genühten nicht; man brauchte 10, 100, wahrscheinlich 1000 und mehr Millionen Elektronenvolt, um auch die festesten Atomkerne anzugreifen.

Allenthalben begannen daher Arbeiten mit dem Ziel, an die Stelle der natürlich radioaktiven Substanzen künstliche Quellen zu setzen, in denen mit Mitteln der Technik Teilchengeschosse nicht nur freigesetzt und beschleunigt wurden, sondern deren Teilchenströme sich auch nach Bedarf an- und abstellen oder verändern ließen.

Bereits die Bezeichnung Elektronenvolt weist den Weg. Man muß möglichst hohe Spannungen anwenden, um elektrisch geladene Teilchen, wie Elektronen, Alphateilchen oder auch Protonen, auf möglichst hohe Geschwindigkeit zu bringen.

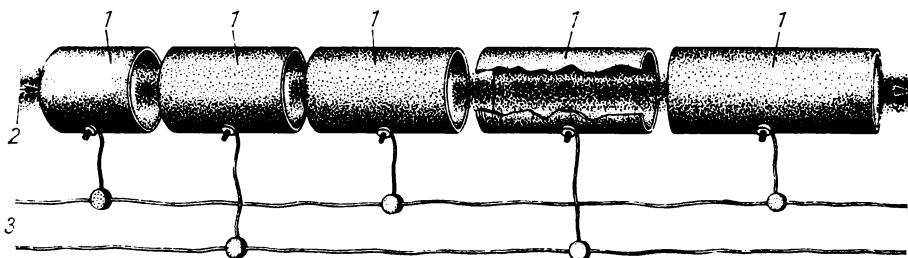
Die verschiedensten Methoden wurden angewandt: Kondensatoren, auf hohe Spannung geladen und dann plötzlich in Reihe geschaltet, so daß sich die Einzelspannungen addieren (Kaskadengenerator). Ebenso erprobt wurde der Bandgenerator, in dem es durch mechanischen, stetigen Transport relativ geringer Elektrizitätsmengen gelingt, sehr hohe Spannungen zu erzielen.

Sogar die Millionen-Volt-Spannungen bei Gewittern versuchte man auszunutzen. In der Schweiz wurden zwischen Bergkämmen Drahtseilnetze ausgespannt, um Blitze »einzufangen« – Versuche, die sogar ein Menschenleben forderten.

Wenn auch mit solchen und anderen Anordnungen Erfolge erzielt wurden, so war man sich doch bald über ihre Grenzen klar. Je höher die Spannungen, desto schwieriger wurde es, sie zu erzeugen und zu beherrschen. Geschoßenergien von vielen Millionen Elektronenvolt waren auf diese Weise nicht zu erreichen.

Es gab jedoch noch einen ganz anderen Weg. Wenn man geladene Teilchen durch eine zwar hohe, aber technisch noch mit relativ einfachen Mitteln zu beherrschende elektrische Spannung nicht nur einmal, sondern – ohne sie zwischendurch zu bremsen – mehrmals nacheinander beschleunigte, mußten sie ebenfalls schneller und immer schneller werden, ähnlich wie eine Schaukel, im richtigen Augenblick periodisch durch eine kleine Kraft angestoßen, höher und höher schwingt.

Eine Lösung, diesen Gedanken zu verwirklichen, ist der Linearbeschleuniger. Zylindrische Elektroden, an einer Wechselspannungsquelle liegend, beschleunigen die Teilchen jedesmal, wenn sie die Lücke von einer zur folgenden Elektrode



Prinzip des Linearbeschleunigers
1 Elektroden; 2 Teilchen; 3 hochfrequente Wechselspannung

passieren. Jedesmal gibt es einen neuen Stoß, jedesmal wird das Teilchen schneller und durchfliegt den folgenden Elektrodenzylinder mit größerer Geschwindigkeit. Damit die Anordnung »im Takt« bleibt, die Teilchen also tatsächlich durch die an den Elektroden liegende Wechselspannung beschleunigt und nicht etwa gebremst werden, müssen die Elektrodenzylinder, wachsender Teilchengeschwindigkeit entsprechend, immer länger werden. Diese Forderung setzt den Abmessungen derartiger Linearbeschleuniger Grenzen. Wenige Meter nur waren die ersten Ausführungen lang, bei einigen Kilometern Länge steht man heute, wobei allerdings aus verschiedenen Gründen bald die äußerste Grenze erreicht sein dürfte.

Geladene Teilchen müssen jedoch nicht unbedingt auf gerader Strecke fliegen, wenn man sie beschleunigen will. Man kann ihre Bahn, zum Beispiel durch ein zusätzliches Magnetfeld, verändern.

Dieser Gedanke wurde durch den amerikanischen Physiker und späteren Nobelpreisträger *E. Orlando Lawrence* (1901 bis 1958) zur Teilchenbeschleunigung ausgenutzt. Sein Zyklotron stand am Anfang der Entwicklung der heute bekanntesten, leistungsfähigsten und verbreitetsten Teilchenbeschleuniger.

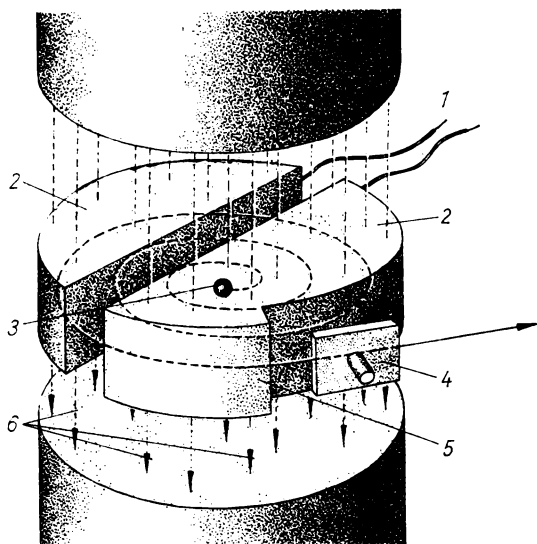
Geladene Teilchen werden durch ein kräftiges Magnetfeld auf eine Kreisbahn gezwungen und bei jeder Runde zweimal kurz beschleunigt. Es ist eine ähnliche Methode, als wenn wir ein Rad dadurch in immer schnellere Drehung versetzen, daß wir es periodisch an seinem Umfang anstoßen.

Im Zyklotron erfolgt das Anstoßen im Spalt zwischen zwei D-förmigen, hohlen Elektroden. Sie sind mit einer hochfrequenten Spannungswelle verbunden, und jedesmal, wenn die Teilchen den Spalt zwischen den beiden »D« passieren, geraten sie in ein beschleunigendes elektrisches Feld. Sie werden daher von Umlauf zu Umlauf schneller; gleichzeitig vergrößert sich der Radius ihrer Flugbahn. Daher durchlaufen sie eine Spiralbahn mit zahlreichen Windungen. Am Rande angelangt, werden sie – wiederum mit Hilfe ablenkender elektrischer Kräfte – als intensiver Teilchenstrahl herausgeführt und können ihr Ziel treffen.

Das erste Modell, von *Lawrence* um 1930 konstruiert, nimmt sich noch recht bescheiden aus: 10 cm etwa beträgt der Durchmesser der evakuierten Beschleunigungskammer mit den darin untergebrachten »D«, die Spannung zwischen den Elektroden liegt unter 2000 V. Bereits in diesem bescheidenen Modell aber erreichen Protonen eine Energie von 80 000 eV. Man ist mit dem Teilchenkarussell auf dem richtigen Wege! Ein Jahr später prallten die beschleunigten Teilchen be-

Prinzip des Zyklotrons

1 Hochfrequenzgenerator; 2 D-förmige Elektroden; 3 Teilchenquelle; 4 Ablenkungseinrichtung für beschleunigte Teilchen; 5 Austrittsfenster; 6 Magnetfeld



reits mit 1 Million eV auf ihr Ziel, 1932 nähert man sich Energien um 5 Millionen eV.

Schon gehört die »10-cm-Kammer« zum alten Eisen. Größer, leistungsfähiger, aufwendiger werden die Zyklotrone. Bald erreicht allein die Masse der Magneten 10, 100, dann Hunderte Tonnen; Beschleunigungsspannung und Frequenz der Spannung an den »D« steigen. Immer schneller werden die Teilchen, immer größer ihre Energie.

Da scheint es, als nähere man sich – wieder einmal – einer Grenze: Sobald die Teilchengeschwindigkeiten nicht mehr sehr weit von der Lichtgeschwindigkeit entfernt sind, macht sich die relativistische Massenzunahme bemerkbar. Die Teilchen werden träger, ihre Geschwindigkeit nimmt von Umlauf zu Umlauf immer langsamer zu. Das jedoch hat zur Folge, daß sie gegenüber der gleichbleibenden Frequenz des Spannungswechsels an den »D« nachzugeben beginnen und außer Tritt fallen.

Im Synchrozyklotron wird dieser Effekt ausgeglichen, indem man die Frequenz der beschleunigenden Spannung in gleichem Maße vermindert, wie die Geschwindigkeitszunahme der Teilchen sinkt. Teilchenenergien um 700 Millionen eV werden auf diese Weise erreicht. Auch das ist noch nicht die Grenze: Im Synchrophasotron ist man bereits bei vielen Milliarden Elektronenvolt angelangt. Dafür ist dieses »Gerät« ein wahrer Gigant, auch unter seinesgleichen: 72 m im Durchmesser beträgt die ringförmige Beschleunigungsbahn des Synchrophasotrons in Dubna, über einen Bahndurchmesser von 470 m verfügt eine andere Anlage in der Sowjetunion.

1932 waren die wenigen Millionen Elektronenvolt der technischen Teilchenquellen eine echte Sensation. Auch sonst, nachdem es Jahre hindurch auf dem Gebiet der Kernforschung in kleineren, durchaus nicht unwichtigen Schritten vorangegangen war, sollte sich gerade 1932 als Erfolgsjahr erweisen.

Das begann bereits, als das neue Jahr nur wenige Stunden alt war: Die Entdeckung des »schweren« Wasserstoffs, des Wasserstoffisotops Deuterium mit der nahezu doppelten relativen Atommasse des »einfachen« Wasserstoffs, wurde bekanntgegeben. Im Deuteron, dem Deuteriumkern, stand später ein weiteres Teilchen für Beschleuniger zur Verfügung.

Hinter dem Aufbau des Atomkerns stand noch immer ein großes Fragezeichen: Wurden seine überschüssigen positiven Ladungen wirklich durch Kernelektronen kompensiert? Bereits *Rutherford* hatte erwogen, daß es im Kern neben Protonen auch nahezu gleich schwere, aber elektrisch neutrale Teilchen geben könne. Existierten solche »Neutronen«, waren Kernelektronen überflüssig.

Auf die Entdeckung der Neutronen führte die Beobachtung, daß bei manchen Versuchen zur Kernumwandlung (zum Beispiel bei der Beschießung von Beryllium mit Alphateilchen) unerwartet eine äußerst energiereiche Strahlung auftritt.

Man hält sie anfänglich für Gammastrahlen, doch zeigen sich Widersprüche, die eher darauf hindeuten, daß es sich hier um eine Teilchenstrahlung aus ungeladenen Partikeln handelt. Wasserstoffkerne zum Beispiel, von der unbekannten Strahlung getroffen, fliegen mit großer Wucht zur Seite, ähnlich wie eine Stahlkugel, die von einer zweiten, gleich schweren getroffen wird. Das ist leicht erklärbar, wenn man Teilchen einer Masse annimmt, die sich nur wenig von der des Protons unterscheidet. Zu erkennen sind die vermuteten Teilchen nur an ihren Wirkungen auf andere Atome; sie hinterlassen keinerlei Spur in der Nebelkammer, sind offenbar auch weder durch elektrische noch durch magnetische Felder zu beeinflussen.

Das alles sind Eigenschaften, die ein Neutron haben müßte. Der englische Physiker und spätere Nobelpreisträger *James Chadwick* (1891 bis 1974) greift diese Vorstellung als Arbeitshypothese auf und untersucht systematisch. Man hatte richtig vermutet. Die unbekannte Strahlung besteht aus Neutronen, elektrisch neutralen Teilchen, deren Masse mit der des Wasserstoffkerns annähernd übereinstimmt. Sie sind zusammen mit den Protonen in den Atomkernen enthalten und werden bei manchen Kernumwandlungen ausgestoßen.

Das Neutron erwies sich als recht nützliches, zugleich aber schwieriges Kernteilchen. Von Atomkernen wurde es nicht abgestoßen. Bereits Neutronen geringer Geschwindigkeit konnten in Atomkerne eindringen, mußten also für die Beschießung von Atomkernen gut geeignet sein. Doch die fehlende Ladung des Neutrons schloß die Möglichkeit aus, es durch elektrische oder magnetische Felder zu beschleunigen oder in bestimmte Bahnen zu zwingen. »Neutronengeschosse« waren daher nur auf Umwegen zu erhalten. Man ließ zum Beispiel Alphateilchen auf einen neutronenabgebenden Stoff prallen und Neutronen »herausschlagen«.

Noch ein weiteres Teilchen bescherte uns das Jahr 1932. Bei Nebelkammeruntersuchungen der kosmischen Strahlung zeigten sich Spuren, die nur von einem »positiven Elektron« stammen konnten, einem Teilchen, das gleiche Ladung wie das Elektron, jedoch mit umgekehrtem, also positivem Vorzeichen trug. Auch dieses Positron, das erste bekannte »Antiteilchen«, war bereits theoretisch vorhergesagt worden und sollte bald nicht nur im Zusammenhang mit der kosmischen Strahlung auftauchen. Um die Jahrhundertwende hatten die *Curies* durch ihre Arbeiten zur Radioaktivität einen entscheidenden Anstoß gegeben, der die Erforschung des Atoms zum zentralen Arbeitsthema vieler Physiker werden ließ.

Die Tochter des Forscherpaares, *Irène Joliot-Curie* (1897 bis 1956), und der Schwiegersohn, *Frédéric Joliot* (1900 bis 1958), leiteten eine weitere wichtige Etappe auf diesem Gebiet ein: Sie entdeckten die künstliche, durch willkürlichen Eingriff in das Atom verursachte Radioaktivität.

Ausgangspunkt ihrer Arbeiten im Sommer 1933 waren die beiden Neulinge des Vorjahres: Neutron und Positron. Man wußte inzwischen einiges, aber längst nicht genug über sie. Zum Beispiel war noch nicht bekannt, bei welchen Kernumwandlungen Neutronen freigesetzt werden, welche Kernumwandlungen sich mit Neutronen als Geschossen herbeiführen ließen; ob das Positron wirklich nur in der kosmischen Strahlung zu finden war oder auch bei Vorgängen im Labor auftrat.

Als die beiden Forscher in ihrem Pariser Institut Aluminium mit Alphateilchen beschossen, bemerkten sie, daß neben Protonen (sie hatte beim gleichen Versuch schon *Rutherford* festgestellt) auch Neutronen und elektrisch geladene, leichte Teilchen ausgestoßen wurden, die nach dem Aussehen ihrer Bahns Spuren in der Nebelkammer eigentlich Elektronen hätten sein müssen.

Das Auftreten dieser Elektronen war nicht erklärbar. Auch wenn man die an den Vorgängen beteiligten elektrischen Ladungen nachrechnete, stimmte irgend etwas nicht. Ja, wenn die Teilchen positiv elektrisch geladen, wenn sie Positronen gewesen wären! Man ließ sie in der Nebelkammer ein Magnetfeld durchfliegen. Die Teilchen wurden zwar nach dem gleichen Gesetz abgelenkt wie Elektronen, aber – nach der entgegengesetzten Seite. Sie waren Positronen.

Wieder hatte man dazugelernt: Positronen waren keine rätselhaften Sendboten aus dem Kosmos; man erhielt sie auch im Labor, wenn man nur ein geeignetes Ziel beschoß, das, wie sich bald herausstellte, keineswegs nur Aluminium zu sein brauchte.

Bereits diese Entdeckung hätte hingereicht, den Namen der »jungen« *Curies* würdig mit dem der »alten« zu verknüpfen. Doch die große Überraschung stand noch bevor:

Das Forscherpaar hatte als selbstverständlich angenommen, das Aluminium würde zu strahlen aufhören, sobald man die Ursache, die Alphastrahlenquelle, entfernte. Doch gerade das war nicht der Fall. Zwar setzte die Neutronenstrahlung, wie erwartet, aus, aber noch viele Minuten später zeigten die Meßinstrumente das Austreten von Positronen an!

Wiederholung des Versuchs, einmal, zehnmal, vielleicht fünfzigmal. Das Ergebnis blieb, verriet aber, als man die Messungen auswertete: Die Intensität der Positronenstrahlung nahm nach der gleichen Gesetzmäßigkeit ab wie die Strahlung radioaktiver Substanzen, diesmal mit einer Halbwertszeit von etwa 10 Minuten.

So merkwürdig es schien: Das vorher stabile, dann aber bestrahlte Aluminium verhielt sich genau wie eine radioaktive Substanz. Wenig später mußte man sich korrigieren. Das bestrahlte Aluminium war eine radioaktive Substanz, die sich jedoch von allen Gliedern der natürlichen radioaktiven Zerfallsreihe dadurch unterschied, daß sie erst nach der Beschießung mit Alphateilchen strahlte.

»Künstliche« Radioaktivität! Der Gedanke fasziniert. Bedeutete er doch nicht nur, daß der Natur ein weiteres Geheimnis abgelistet wurde, sondern daß man die Erforschung und Anwendung der Radioaktivität nunmehr aktiv betreiben kann.

Man wird, diese Hoffnung ist zumindest nicht unbegründet, in Zukunft radio-

aktive Substanzen »selbst machen« können, wird vielleicht nicht mehr auf die Stoffe angewiesen sein, die die Natur anbietet, wird genügend radioaktives Material für alle nur denkbaren Anwendungen zur Verfügung haben.

Doch das sind vorerst Zukunftspläne, und die *Joliot-Curies* wußten damals, daß ihre Arbeit – und die ihrer Kollegen – mit dem Bericht, den sie Mitte Januar 1934 der Französischen Akademie der Wissenschaften vorlegten, erst richtig begann.

Es muß festgestellt werden, was aus dem Kern des strahlenden Aluminiums wird, auch aus Kernen von Bor und Magnesium, die sich gleichfalls bald als »Radioelemente« erweisen. Es ist zu untersuchen, welche weiteren Elemente, vielleicht durch andere Geschosse, zum Strahlen gebracht werden können und ob dabei auch andere Arten radioaktiver Strahlung auftreten. Halbwertszeiten, Strahlungsintensitäten sind zu messen, umfangreiche Berechnungen auszuführen.

Nach jahrelanger Arbeit weiß man: Von jedem Element des Periodensystems gibt es mindestens ein, meistens mehrere radioaktive Isotope, deren Kerne sich durch Strahlung umwandeln, mit Halbwertszeiten, die manchmal nach Minuten, manchmal nach Jahren zählen, Isotope, die sich vom zugehörigen stabilen, nicht strahlenden Element chemisch in keiner Weise unterscheiden, sich aber stets und auch in geringsten Mengen durch die von ihnen ausgehende Strahlung nachweisen lassen.

Gerade die Tatsache, daß radioaktive Isotope sich niemals verbergen können, hat sie in den vergangenen Jahrzehnten so weitreichende Bedeutung erlangen lassen. Man kann, auch wo ihre Strahlung nicht »aktiv« – zum Beispiel in der Bekämpfung bösartiger Geschwülste oder in der Steuerungs- und Regelungstechnik – eingesetzt wird, ihren Weg stets verfolgen, unabhängig davon, an welchen physikalischen oder chemischen Vorgängen sie teilhaben. Zahlreiche Erscheinungen aus der Chemie, der Biologie, der Metallurgie, der Werkstoffkunde und vielen anderen Wissenszweigen konnten mit Hilfe der radioaktiven Isotope – mehr als 1000 sind bis heute bekannt – erstmals befriedigend aufgeklärt werden. Zahlreiche früher als unheilbar geltende Kranke verdanken ihnen ihr Leben.

Die Anfänge dieser Methoden fallen in die Zeit unmittelbar nach der Entdeckung der künstlichen Radioaktivität. Zugleich aber gingen von ihr wichtige Impulse für jene Entwicklungen aus, die zur Freisetzung der in den Atomkernen eingeschlossenen Energie führten.

Einen Weg dorthin sah man allerdings 1934 noch nicht. Stets war der Energieaufwand für Kernumwandlungen um ein Vielfaches größer als die freigesetzte Energie, eine Folge dessen, daß nach wie vor die meisten Geschosse ihr Ziel verfehlten. Obwohl Neutronen als Kerngeschosse besser als zum Beispiel Alphateilchen geeignet waren, änderten auch sie – zumal sie nur auf Umwegen zu erhalten waren – im Prinzip daran nichts.

Selbst *Rutherford* glaubte nicht, daß es eines Tages möglich sein werde, die Atomkernenergie technisch zu nutzen.

So hatte auch der junge italienische Physiker *Enrico Fermi* (1901 bis 1954), der später durch die italienischen Faschisten zum Verlassen seiner Heimat gezwungen wurde, kaum die Atomenergie im Blickpunkt, als er mit seinen Mitarbeitern daranging, Atome zahlreicher Elemente systematisch mit Neutronen zu beschie-

ßen. Innerhalb kurzer Zeit waren mehrere Dutzende radioaktiver Isotope festgestellt und ihre Halbwertszeiten gemessen. Diese Isotope ließen sich in das Periodensystem einordnen, und alles schien in schönster Ordnung.

Während man sich früher vor allem mit leichten Atomkernen befassen mußte, konnte *Fermi* mit den ladungslosen Neutronen auch die Atome vom »schweren Ende« des Periodensystems angehen. Hierbei stellte man erstaunt fest: Häufig paßten umgewandelte Urankerne in keiner Weise unter die bekannten Elemente. Wenn nun aber im Endergebnis der Bombardierung die Kerne des Urans nicht, wie *Fermi* erwartet hatte, leichter, sondern schwerer geworden waren? Wenn die Neutronen, wie man es bei zahlreichen anderen Elementen bereits festgestellt hatte, im Urankern steckengeblieben waren und sich durch den ablaufenden radioaktiven Prozeß die Ordnungszahl des beschossenen Elements, seine Stellung im Periodensystem, erhöht hatte?

Fermi wagt zunächst kaum, an diese Möglichkeit zu glauben. Das ist verständlich, denn sie bedeutet: Durch Neutronenbeschuß ist es möglich, nicht nur radioaktive Isotope bekannter Grundstoffe zu schaffen, sondern neue Elemente, Elemente, die im Periodensystem jenseits des Urans einzuordnen wären, Elemente, die man auf der Erde noch nicht gefunden hatte, die es unter Umständen überhaupt noch nicht gab oder niemals gegeben hatte! Vielleicht konnte man so eines Tages chemisch oder technisch nützliche Elemente nach Wunsch konstruieren?

So phantastisch die Vorstellung von »Transuranen« anfänglich erscheint – je mehr *Fermi* sie durchdenkt, untersucht, berechnet, desto sicherer wird er sich seiner Sache. Im Sommer 1934 veröffentlicht er seine Resultate – nicht ahnend, daß er sich doch geirrt hatte und in Wahrheit bei seinen Versuchen eintrat, was vier Jahre später die ganze wissenschaftliche Welt aufhorchen lassen sollte: Die Spaltung des Atomkerns in zwei etwa gleichgroße Stücke, die die deutsche Chemikerin *Ida Noddack* schon bald nach *Fermis* Versuchen angedeutet hatte.

Auch in Deutschland nahm man sich die Transurane vor, prüfte *Fermis* Resultate nach, versuchte weiteres Material zusammenzutragen. Hier war es vor allem das Forschergespann *Otto Hahn* (1889 bis 1968), die Österreicherin *Lise Meitner* (1878 bis 1968) und ihr Mitarbeiter *Fritz Straßmann* (1902 bis 1980), das dieses Thema bearbeitete. Alle drei hatten sich bereits in ihrer Wissenschaft einen Namen gemacht, alle drei kannten die Probleme und Methoden der radioaktiven Erscheinungen. Trotzdem mußte *Lise Meitner* unter dem Zwang des faschistischen Rassenwahns im Sommer 1938 die ihr liebgewordene Arbeitsstätte in Berlin bei Nacht und Nebel verlassen und ins Ausland fliehen.

Jahrelange gemeinsame Beobachtungen von *Hahn* und *Straßmann*, an denen anfänglich auch *Lise Meitner* beteiligt war, hatten die Beobachtungen *Fermis* zunächst scheinbar bestätigt. Allmählich kam sogar Ordnung in die zunächst recht komplizierten Zerfallsvorgänge der schweren Elemente. Aber es tauchten auch Ungereimtheiten, ja ernsthafte Widersprüche auf. Im Pariser Radiuminstitut wurde ein rätselhafter Stoff nachgewiesen, den man wegen seiner Halbwertszeit Drei-einhalb-Stunden-Körper taufte und der sich allen Einordnungsversuchen entzog. *Hahn* und *Straßmann* stießen später auf eine weitere Merkwürdigkeit: Bei der Beschießung des Urans schienen mehrere »neue« Radiumisotope zu entstehen.

178 Sie erregten von Anfang an Zweifel, ja Widerspruch, und auch der eindeutige

Nachweis, daß es sich wirklich um Radium handele, gelang nicht. Zwar waren die unbekannten Substanzen dem Radium sehr ähnlich, aber es gab keine völlige Übereinstimmung. Übrigens war auch aus theoretischen Erwägungen das Entstehen von Radium wenig wahrscheinlich.

Eher schon hätte eine der neuen Substanzen Barium sein können, dessen Eigenschaften denen des Radiums sehr nahekommen. Doch auch gegen diese Annahme gab es ein ernsthaftes Argument: Bei sämtlichen bisher bekannten Kernumwandlungen waren Elemente gewonnen worden, die im Periodensystem in unmittelbarer Nähe des bestrahlten Elements standen. Barium und Radium jedoch unterschieden sich in ihren relativen Atommassen ganz erheblich und lagen im Periodensystem an weit voneinander entfernten Plätzen. Mit den Vorstellungen über den Ablauf der bisher bekannten Kernumwandlungen wäre das Entstehen von Barium nicht zu erklären gewesen.

Trotzdem machten sich *Hahn* und *Straßmann* an die Arbeit, jetzt mit dem Ziel, nachzuweisen, daß das vermeintliche Radium in Wirklichkeit Barium ist. Und dieser Beweis gelang!

Durch den Beschuß des Urankerns ist tatsächlich Barium gebildet worden. Das aber heißt: Diesmal wurden die Atomkerne nicht umgewandelt, indem sie zum Beispiel Geschosse einfingen und dafür andere Teilchen abgaben, sondern sie waren, wie *Hahn* es ausdrückte, zerplatzt, und eines der Bruchstücke war Barium, während man im anderen das Edelgas Krypton erkannte. (Dies ist nur eine von zahlreichen Spaltungsmöglichkeiten.)

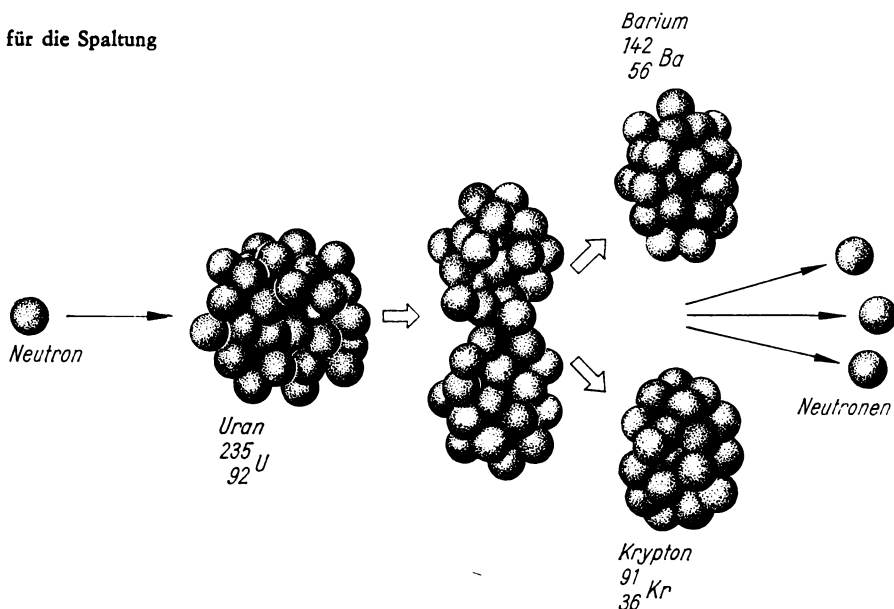
Die Kernzertrümmerung, besser Kernspaltung, als Möglichkeit in den vorausgegangenen Jahren immer wieder diskutiert, war also gelungen. Das ist so neu, so unerwartet, daß *Hahn* und *Straßmann* sich – obgleich von der Richtigkeit ihrer Annahme überzeugt – in ihrer ersten Veröffentlichung (vom Januar 1939) noch sehr vorsichtig ausdrücken und einräumen, ihre Ergebnisse »könnten durch eine Reihe seltsamer Zufälle vorgetäuscht« sein.

Noch ehe *Hahn* und *Straßmann* ihre Resultate publizierten, haben sie der ehemaligen Kollegin *Lise Meitner* vom jüngsten Stand ihrer Arbeiten berichtet. Sie rechnete, zusammen mit dem Physiker *Otto Robert Frisch*, die Ergebnisse nach und kam zum gleichen Resultat wie *Hahn*. Auch eine weitere wichtige Schlußfolgerung zwang sich auf: Bei der Spaltung des Urankerns muß ein weit größerer Energiebetrag freiwerden als bei allen demgegenüber geradezu sparsamen bekannten Atomkernumwandlungen.

Innerhalb weniger Wochen wiesen Forscher in verschiedenen Ländern experimentell die Urantrümmer und ihre hohe Energie nach. Würde es nunmehr gelingen, die Kernenergie – 25 Millionen kWh hatte man für die Spaltung von nur 1 kg Uran errechnet – in den Griff zu bekommen?

Die Physiker waren nach wie vor nicht allzu optimistisch. Viele Tausende Neutronen müßten auf Umwegen gewonnen und verschossen werden, ehe auch nur ein Urankern getroffen wird. Das ergäbe insgesamt eine negative Energiebilanz. Mit ihr kann man sich bei Laborversuchen abfinden, wenn nur die Erlangung neuer Erkenntnisse im Vordergrund steht; eine technische Nutzung, bei der eine entscheidende Größe der Wirkungsgrad ist, wäre unter solchen Voraussetzungen sinnlos.

Eine Möglichkeit für die Spaltung
eines Urankerns



Fast schien es, als stünde man wieder vor einer unüberwindlichen Barriere. Doch diesmal kommt Hilfe von den zu spaltenden Kernen selbst. Die Kerne schwerer Atome weisen im Verhältnis zu ihrer Protonenzahl mehr Neutronen auf als diejenigen leichter. Der Kern des Urans aber zerplatzt in leichtere Stücke, in Atomkerne also, die relativ weniger Neutronen enthalten. Daher könnte es sein, daß bei der Spaltung des Urankerns einige Neutronen übrigbleiben. *Hahn, Straßmann* und andere Physiker vermuten das. Im Pariser Radiuminstitut bemühen sich *Joliot* und seine Helfer um einen experimentellen Beweis dieser Annahme. Im Frühjahr 1939 ist er erbracht: Von gespaltenen Urankernen werden im Mittel 2 oder 3 Neutronen freigesetzt.

Damit ergibt sich, wenn auch für mehrere Jahre nur erst auf dem Papier, ein geradezu unwahrscheinlich wirkender Ausblick:

Angenommen, die bei der Kernspaltung freigesetzten Neutronen könnten selbst als Geschosse weitere Urankerne spalten – dann würde in einem Stück Uran der erste Treffer durch ein Neutron 2 oder 3 neue Geschosse liefern. Diese würden 2 oder 3 weitere Urankerne spalten, die dabei freiwerdenden Neutronen sich auf weitere Urankerne stürzen können und so fort. Die Neutronenzahl würde lawinenartig anschwellen, eine gewaltige Energiemenge innerhalb kürzester Zeit freigesetzt werden.

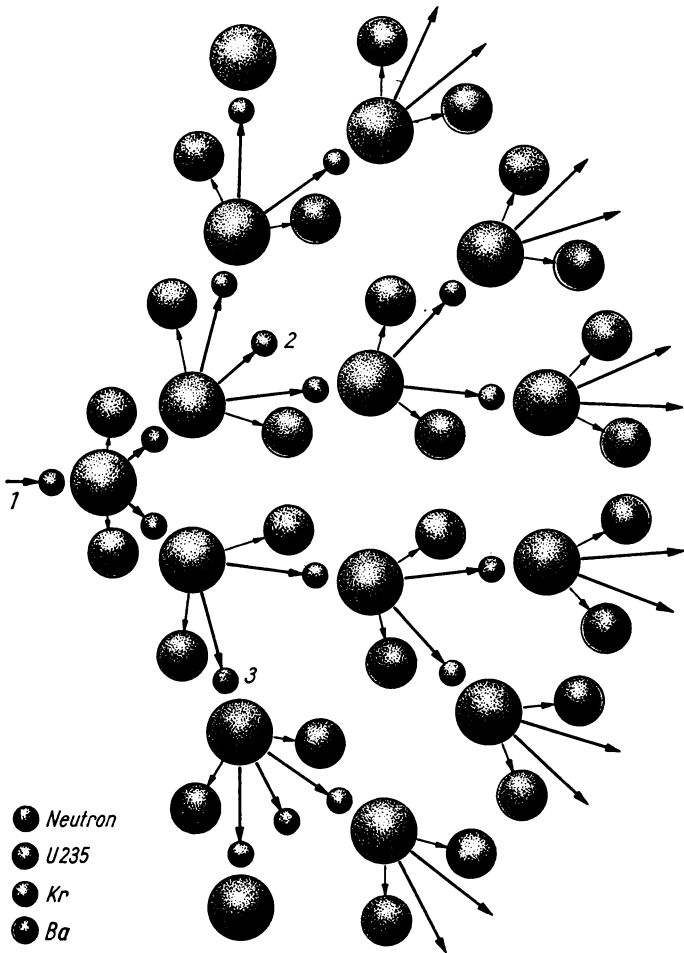
»Kann der Energieinhalt der Atomkerne technisch nutzbar gemacht werden?« Diese Frage, Überschrift einer der ersten deutschen Veröffentlichungen über die »Kettenreaktion« (im Frühsommer 1939), war nicht mehr nur Gegenstand theoretischer Seminare oder auch utopischer Erzählungen, sondern höchst aktuelles Forschungs- und Arbeitsthema.

Der Weg von der theoretischen Erkenntnis der Möglichkeit bis zur Verwirklichung der Kettenreaktion erwies sich als steinig und streckenweise noch unübersichtlich. Nur einige seiner Etappen seien angedeutet.

Da ein Neutron zur Auslösung der Kettenreaktion genügt, mußte man erklären können, warum die Uranvorräte der Welt nicht längst durch Kettenreaktionen gespalten waren, statt sich über sehr lange Zeiträume hinweg und über zahlreiche Zwischenstufen in Blei zu verwandeln.

Man erkannte, daß durchaus nicht alle Neutronen, sondern nur solche innerhalb eines bestimmten Geschwindigkeitsbereichs Urankerne spalten können – auch zu schnelle Neutronen verletzen den Urankern nicht. Die meisten Neutronen gehen außerdem bereits vorher verloren, entweichen oder werden von Kernen anderer Atome eingefangen, ohne diese zu spalten.

Daran ist, wie sich herausstellte, das Uran selbst maßgeblich beteiligt. So, wie es in der Natur vorkommt, ist es ein Gemisch aus mehreren Isotopen. Nur das Isotop



Kettenreaktion in U^{235}
 1 auslösendes Neutron; 2 entweichende Neutronen; 3 Neutronen, die weitere Kernspaltungen auslösen

mit der relativen Atommasse 235 – das später weltberühmt gewordene »U 235« – ist für eine unmittelbare Spaltung geeignet, während zum Beispiel das Isotop mit der relativen Atommasse 238 (es stellt im natürlichen Uran den weitaus größten Anteil) Neutronen wegfängt und sich einverleibt.

Dabei bevorzugt es schnelle Neutronen, und das eröffnet einen Ausweg zur Verminderung der Neutronenverluste. Sie sinken, wenn man die bei der Kernspaltung freigesetzten Neutronen so abbremst, daß sie für das U 238 »zu langsam« sind. Also galt es Stoffe zu finden, die als Neutronenbremse geeignet waren.

Vor allem aber: Man durfte die Kettenreaktion nicht sich selbst überlassen. Freisetzung großer Energiemengen in einem winzigen Sekundenbruchteil bedeutet nichts anderes als eine gewaltige Explosion. Zur Energiegewinnung aber brauchte man nicht »Dynamit«, sondern stetig verbrennende »Kohle«. Also hieß es Methoden zu suchen, mit denen sich der Ablauf der Kettenreaktion steuern ließ, mit deren Hilfe man willkürlich mehr oder weniger spaltende Neutronen gewinnen und auf jeden Fall die Explosion verhindern konnte.

Schritt für Schritt tastete man sich vor, weitgehend auf Überlegungen und Berechnungen angewiesen. Denn wenig nur ließ sich hier experimentell herausfinden und erproben – vor allem nicht das unausweichliche, entscheidende Experiment: Eine bestimmte Mindestmenge Uran mußte, zusammen mit bremsenden Materialien und Sicherheitsvorrichtungen, beisammen sein, damit die Kettenreaktion gezündet werden konnte. Ein Versuch im Reagenzglas und auf dem Laboratoriumstisch war diesmal nicht denkbar.

Im Dezember 1942 war der entscheidende Zeitpunkt erreicht. Unter einer Sportplatztribüne in den USA hatte man unter *Fermis* Leitung den ersten Atommeiler zusammengesetzt. Uran als Brennstoff, Graphit als Bremsmittel für Neutronen und Cadmiumstäbe zur Steuerung der erwarteten Kettenreaktion waren seine Hauptbestandteile; Hunderte Meßinstrumente belauschten sein Verhalten und jede seiner Reaktionen.

Würde es zur Kettenreaktion kommen? Wenn ja, würde es gelingen, sie unter Kontrolle zu halten und die sonst sichere Katastrophe zu verhindern? Oder würde vielleicht gar nichts geschehen, die Arbeit von Jahren vergeblich gewesen sein? Niemand der Beteiligten wußte das mit Bestimmtheit zu sagen, nicht einmal *Enrico Fermi*.

Doch nachdem die Anlage eingeschaltet worden war, gaben die Instrumentenanzeiger eine eindeutige Antwort: Die Kettenreaktion war angelaufen, so, wie man es vorher errechnet hatte. Der Kernreaktor lieferte Energie – Bruchteile eines Watts zuerst, später wenige Hunderte Watt.

Was *Einstein* Jahrzehnte vorher vermutete, was Wissenschaftler vieler Nationen gehofft, woran sie gemeinsam gearbeitet hatten, war Wirklichkeit geworden: Es war gelungen, die Energie der Atomkerne freizusetzen und damit eine schier unerschöpfliche Energiequelle zu erschließen. Welch ein Triumph der Wissenschaft!

Triumph? Nur ein kleiner, sorgsam ausgewählter Kreis erfuhr von den Versuchen und ihrem Gelingen. Der erste Atommeiler, wohl das kühnste Experiment, das Menschen bis dahin wagten, war zugleich Ausgangspunkt des schändlichsten Mißbrauchs, der je mit der Wissenschaft getrieben wurde. Die herrschende Klasse der USA, ihre Politiker und Militärs, nicht zuletzt die Mammutkonzerne der Chemie-

und Elektroindustrie, wollten nicht die »Kohle«, die Atomenergie, sondern das »Dynamit«, die Atombombe. Unter gigantischem Einsatz von Menschen und Material wurde diese furchtbare Entwicklung vorangetrieben.

Verantwortungsbewußte Wissenschaftler, Schrittmacher der Kernforschung, die wie niemand sonst Möglichkeiten und Gefahren der Kernenergie abschätzen konnten, meldeten sich zu Wort.

1944 warnte *Niels Bohr*, der dem faschistischen Zugriff mit knapper Not entkommen war, in einer Denkschrift vor dem Einsatz dieser fürchterlichen Waffe und versuchte, durch eine Unterredung mit dem USA-Präsidenten *Roosevelt* ihren Einsatz zu verhindern.

Im Frühsommer des darauffolgenden Jahres wandten sich *James Franck* (1882 bis 1964) und sechs führende Kernphysiker mit einer Eingabe – als Franck-Report bekanntgeworden – an das Kriegsministerium der USA, rieten dringend vom Einsatz der Bombe ab, empfahlen, statt dessen Vertretern der Vereinten Nationen eine Versuchsexplosion vorzuführen. Vergebens.

Die erste Bombe, die wenige Wochen danach auf dem Versuchsgelände von Alamogordo gezündet wird, ist kein Anschauungsmittel, um Japan zur Einstellung des Kampfes zu zwingen, sondern die Generalprobe für Hiroshima und Nagasaki. Keine vier Wochen später sind beide Städte nur noch Trümmerwüsten.

Die Atombomben, zu einem Zeitpunkt abgeworfen, da der Krieg längst entschieden und sein Ende in unmittelbare Nähe gerückt war, sollten vor allem »big stick«, der dicke Knüppel sein, mit dem die USA auch nach dem Kriege drohen, den sie rücksichtslos gegen alle Völker und Staaten einsetzen würden, die sich der imperialistischen Machtgier widersetzen.

Diese Rechnung ging nicht auf. Nicht zuletzt unter dem Eindruck des Grauens von Hiroshima und Nagasaki wuchs die Zahl derjenigen Forscher ständig, die – wie es schon im Franck-Report ausgesprochen wurde – sich ihrer Verantwortung gegenüber der Gesellschaft bewußt waren und sich aktiv dafür rückhaltlos einsetzten, daß die Wissenschaft ihrem friedlichen Ziel, »die Mühsal der menschlichen Existenz zu erleichtern« (dieses Wort legt *Brecht* seinem *Galilei* in den Mund), dienen konnte.

Robert Oppenheimer (1904 bis 1962), wissenschaftlicher Leiter des Atombombenprojekts, lehnte die Beteiligung an der Entwicklung der Wasserstoffbombe ab, *Frédéric Joliot*, dem Frankreich seinen ersten Kernreaktor verdankte, wurde zwar als Leiter der französischen Atomenergiebehörde abgelöst, weil er sich rückhaltlos zur nur friedlichen Anwendung der Kernenergie bekannte, setzte aber als Präsident des Weltfriedensrates seinen Kampf um so konsequenter fort.

Er stand nicht allein: denn was er vertrat, war die Sache von Tausenden Wissenschaftlern, von Millionen friedliebenden Menschen in aller Welt. Ihnen ist zu danken, daß die Anhänger des »big stick« in ihre Schranken verwiesen wurden.

Jener Junitag des Jahres 1954 aber, an dem in einem sozialistischen Land, der Sowjetunion, das erste Kernkraftwerk der Welt seinen Betrieb aufnahm, wird für immer ein Meilenstein des menschlichen Fortschritts bleiben.

Die Physik ist nicht ohne Experimente zu denken. Sie werden immer wieder zu neuen Erkenntnissen führen. Wir sind dazu berufen, darüber zu wachen, daß sie der Menschheit zum Nutzen, niemals aber mehr zum Schaden gereichen.

*Quellennachweis
der zitierten
Veröffentlichungen*

Bieberbach, L.: Galilei und die Inquisition. München 1938
Engels, F.: Dialektik der Natur. 7. Auflage. Berlin 1973, S. 190 ff.

Euler, L.: Briefe an eine deutsche Prinzessin über verschiedene Gegenstände der Physik und Philosophie. (Petersburg 1768). Übersetzt von F. Dannemann in: Aus der Werkstatt großer Forscher. Leipzig 1908.

Galilei, Galileo: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend. Aus dem Italienischen übersetzt und herausgegeben von A. J. v. Oettingen. Leipzig 1890

Galvani, L.: Abhandlung über die Kräfte der Elektrizität bei der Muskelbewegung. Herausgegeben von A. J. v. Oettingen. Leipzig 1894

Gilbert, W.: Physiologia nova de magnete magneticisque corporibus et de magno magnete tellure. (London 1600). Übersetzt von F. Dannemann in: Aus der Werkstatt großer Forscher. Leipzig 1908

Grimaldi, F. M.: Physico-mathesis de lumine. (Bologna 1665). Übersetzt von F. Dannemann in: Die Naturwissenschaft in ihrer Entwicklung und ihrem Zusammenhang, Band II. Leipzig 1911

Guericke, O. v.: Neue »Magdeburgische« Versuche über den leeren Raum. Aus dem Lateinischen übersetzt und mit Anmerkungen herausgegeben von F. Dannemann. Leipzig 1894

Hertz, H.: Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität. Bonn 1889

Huygens, Ch.: Abhandlung über das Licht. Übersetzte und erläuterte Ausgabe von E. Lommel. Leipzig 1890

Kirchhoff, G.: Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spektren der chemischen Elemente. Abhandlungen der Königlich Akademie der Wissenschaften. Berlin 1861/62

Kirchhoff, G., und R. Bunsen: Chemische Analyse durch Spektralbeobachtungen. Leipzig 1895

Newton, Sir Isaac: Optics or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light. (London 1704). Übersetzt und herausgegeben von W. Abendroth. Leipzig 1898

Oersted, H. Ch.: Versuche über die Wirkung des elektrischen Stromes auf die Magnetnadel. Herausgegeben von A. J. von Oettingen. Leipzig 1895

Pascal, B.: Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs. (Paris 1648). Übersetzt von F. Dannemann in: Aus der Werkstatt großer Forscher. Leipzig 1908

Skłodowska-Curie, Marie: Selbstbiographie. Leipzig 1962

Volta, A.: Über die Elektrizität, welche durch bloße Berüh-

rung verschiedenartiger leitender Stoffe hervorgerufen wird.
Brief vom 20. 3. 1800 an den Präsidenten der Royal Society.
Übersetzt von F. Dannemann in: Aus der Werkstatt großer
Forscher. Leipzig 1908

Voltaire: *Eléments de la philosophie de Newton*. (Amsterdam 1738). Übersetzt von F. Dannemann aus: *Oeuvres complètes de Voltaire*, Bd. 31. Gotha 1786

Young, Th.: *On the theory of light and colours*. Phil. Transactions. London 1802

Zimmermann, W. F. A.: *Populäres Handbuch der Physik zum Selbstunterricht für die Gebildeten jedes Standes*. Berlin 1856

Namenverzeichnis

- Äpinus, F. M. U. T. 66
 Ampère, A. M. 68, 70 ff.
 Arago, D. F. 66
 Aristoteles 11, 17

 Barkhausen, H. 74
 Becquerel, H. 140 ff.
 Bernoulli, D. 77
 Biot, J. B. 66
 Blackett, P. M. S. 170
 Bohr, N. 164, 183
 Boyle, R. 77
 Bradley, J. 42 ff.
 Bunsen, R. W. 104 ff.

 Carnot, N. L. S. 79
 Cassini, G. D. 41
 Cavendish, H. 24 f.
 Chadwick, J. 175
 Colding, A. L. 84
 Crookes, W. 113
 Cünäus 52
 Curie, M. 139, 142 ff.
 Curie, P. 142, 164

 Davy, H. 66, 78 f.
 Demokrit 27

 Einstein, A. 162, 164 ff., 182
 Engels, F. 75, 157
 Euler, L. 77, 106 f., 155

 Faraday, M. 74, 110, 130
 Feddersen, W. 131
 Fermi, E. 177 f., 182
 Fizeau, A. L. H. 44 ff., 161
 Foucault, B. L. 46 f., 103
 Franck, J. 183
 Franklin, B. 52 f., 66
 Fraunhofer, J. 101 ff.
 Fresnel, J. A. 94 f.
 Friedrich, W. 128
 Frisch, O. R. 179

 Galilei, G. 9 ff., 28, 39 f.

 Galvani, L. 51, 53 ff.
 Gay-Lussac, L. J. 70
 Geißler, H. 111 f.
 Gilbert, W. 65
 Goethe, J. W. 90 ff.
 Goldstein, E. 113
 Grimaldi, F. M. 88
 Guericke, O. v. 31 ff., 117

 Hahn, O. 178 ff.
 Helmholtz, H. v. 80, 84, 130 f.
 Herschel, F. W. 100
 Hertz, H. 113, 129 ff., 157
 Hirn, G. A. 84
 Hittorf, W. 111
 Huygens, C. 18, 77, 88 ff.,
 153 ff.

 Joliot, F. 176 ff., 180, 183
 Joliot-Curie, I. 176 ff.
 Joule, J. P. 81 ff.

 Kepler, J. 11, 22
 Kerr, J. 48
 Kirchhoff, G. R. 104 ff.
 Kleist, G. v. 52
 Knipping, P. 128
 Kohlrausch, F. 48, 121
 Kopernikus, N. 11
 Kundt, A. 122

 Lavoisier, A. L. 77
 Lawrence, E. O. 173
 Lenard, P. 114
 Lenin, W. I. 51, 109
 Lichtenberg, G. C. 52
 Lomonossow, M. W. 77, 79,
 91

 Malus, E.-L. 94
 Maxwell, J. C. 130, 157
 Mayer, J. R. 80 ff.
 Meitner, L. 178 ff.
 Michelson, A. A. 48, 158 ff.
 Millikan, R. A. 117
 Morley, E. W. 158 ff.

Newton, I. 14, 20 ff., 85 ff.,
97 ff., 155
Noddack, I. 178

Oersted, H. C. 66 ff.
Ohm, G. S. 63
Oppenheimer, R. 183

Pascal, B. 30
Perrin, J. 114 f.
Planck, M. 164
Plinius d. Ä. 53
Plücker, J. 111
Poincaré, H. 139
Popow, A. S. 55

Ramsay, W. 148
Richarz, F. 25
Ritter, J. W. 66, 100
Römer, O. 41
Röntgen, W. C. 121 ff.
Rühmkorff, D. 123
Rumford, Graf 77 ff.
Rutherford, E. 145 ff., 164,
166 ff.

Savart, F. 66
Schelle, C. W. 100
Seebeck, T. J. 70
Soddy, F. 145 ff.
Straßmann, F. 178 ff.
Sulzer, J. G. 57

Thompson, B., s. Rumford
Thomson, J. J. 115
Thomson, W. 132
Torricelli, E. 28 ff.

Volta, A. 56 ff.
Voltaire 21

Walsh, J. 53
Weber, W. 48
Wiechert, E. 116
Wien, W. 116
Wilson, C. T. R. 169
Winkler, J. H. 111
Wollaston, W. H. 101

Young, T. 92 ff.

Sachwortverzeichnis

- Aberration 43
- Äther 89, 153
 - wind 158
- Alphastrahlen 145 ff.
- Atom 164 ff.
 - bombe 183
 - energie 182
 - kern 164
 - meiler 182
 - modell 164
- Bandgenerator 172
- Beschleuniger 169 ff.
- Betastrahlen 145 ff.
- Beugung des Lichts 87 f.
- Blitzableiter 52
- Dampfmaschine 79
- Deuterium 175
- Doppelbrechung 93 f.
- Dreh-spiegelmethode 46 f.
 - waage 24 f.
- Elektrizität 109 ff.
 - elektro-chemische Erscheinungen 110
 - magnetische Wellen 130 ff.
 - magnetisches Feld 130
- Elektro-magnet 68
 - magnetismus 67
- Elektron 109 ff., 144
- Elektronen-ladung 117
 - –, spezifische 116
 - masse 117
 - strahlofen 112
 - volt 172
- Elektroskop 57
- Element, galvanisches 59, 62
- Elementarladung, elektrische 117
- Emanationstheorie 86
- Emissionstheorie 86
- Energie, Erhaltung der 82 ff.
- Erdmagnetismus, Einfluß des 71
- Expansionsnebelkammer 169 f.
- Fall-beschleunigung 15
 - geschwindigkeit 11
 - gesetz 9, 15
 - röhre 13
- Feld, elektromagnetisches 130
- Fixsternparallaxe 42
- Flugbahn beim Wurf 19
- Fluoreszenzerscheinungen 140
- Franck-Report 183
- Fraunhofersche Linie 102 ff.
- Galilei, Eid des 10
- galvanisches Element 59, 62
- Gammastrahlen 145
- Gravitations-gesetz 22
 - konstante 24 ff.
- Halbwertszeit 151
- horror vacui 28 ff.
- Huygenssches Prinzip 90
- Infrarotstrahlung 100
- Interferenz 88
- Interferometer 158
- Isotope, radioaktive 177
- Jupitermonde, Umlaufzeit 41
- Kaskadengenerator 172
- Katodenstrahlen 113 ff.
- Keplersche Gesetze 21
- Kern-energie 179
 - kraftwerk, erstes 183
 - reaktionen 171
 - reaktor 245
 - spaltung 179
- Kerrzelle 48
- Kettenreaktion 80 ff.
- Leidener Flasche 52
- Leiter, Vorgänge im 110
- Leitungselektronen 119

- Lenardsches Fenster 114
- Licht-brechung 86
 - geschwindigkeit 40 ff.
- –, moderne Messungen 48 f.
- Linearbeschleuniger 172
- Linienpektrum 104 ff.
- Luft-druck 29, 35
 - elektrizität 52
 - pumpe 33 ff.
 - widerstand 12, 14, 20
- Magdeburger Halbkugeln 38
- Magnetismus 66
- Massedefekt 166
- mechanisches Wärme-
äquivalent 79 ff.
- Michelson-Versuch 159 ff.
- Millikan-Versuch 117
- Neutronen 175 f.
- Öltröpfchenmethode 117
- Ohmsches Gesetz 63
- Oszillator, Hertzscher 132 f.
- Pendel 17 f.
 - uhr 18
- Perpetuum mobile 79
- Planetenmodell 164
- Polarisation 93 ff.
- Polonium 142
- Positron 175
- Quecksilberbarometer 29
- radioaktive Familien 151
 - Isotope 117
- Radioaktivität 139 ff., 176
- Radium 143
 - emanation 147
 - strahlung, Untersuchung
der 143 ff.
- Radon 148
- Reibungswärme 78
- Relativitätstheorie, spezielle
162
- Resonator 133
- Röntgenstrahlen 128 ff.
- Saugpumpe 28
- schiefe Ebene 16
- Schwerkraft 22
- Schwingungskreis 133
- Sonnenspektrum 98, 103
- Spannungsreihe 58
- Spektralanalyse 104 ff.
- Spektrometer 105
- Spektrum 97 ff.
- spezielle Relativitätstheorie
162
- Spinthariskop 150 f., 164
- Stoßversuche 84
- Synchro-phasotron 174
 - zyklotron 173 f.
- Teilchenhypothese 86
- Thorium 142
 - emanation 147
- Trägheitsgesetz 14
- Transurane 178
- Ultraviolettstrahlung 100
- Uran 140 ff.
- Vakuum 27 ff.
- Voltasche Säule 59 f.
- Wärme-äquivalent, mecha-
nisches 79 ff.
 - lehre 75
- Wellen, elektromagnetische
130 ff.
 - hypothese 88
- Wettervorhersage Guericques
36
- Wurf-bewegung 19
 - parabel 19
- X-Strahlen 126 ff.
- Zahnradmethode 44 ff.
- Zyklotron 173 f.

© VEB Fachbuchverlag Leipzig 1983
4., verbesserte Auflage
Lizenznummer: 114-210/82/83
LSV 3009
Verlagslektor: Helga Schmiedel
Illustrationen: Lutz-Erich Müller, Leipzig
Gestaltung: Egon Hunger
Printed in GDR
Gesamtherstellung: INTERDRUCK
Graphischer Großbetrieb Leipzig, Betrieb
der ausgezeichneten Qualitätsarbeit, III/18/97
Redaktionsschluß: 15. 1. 1983
Bestellnummer: 546 046 5
DDR  M