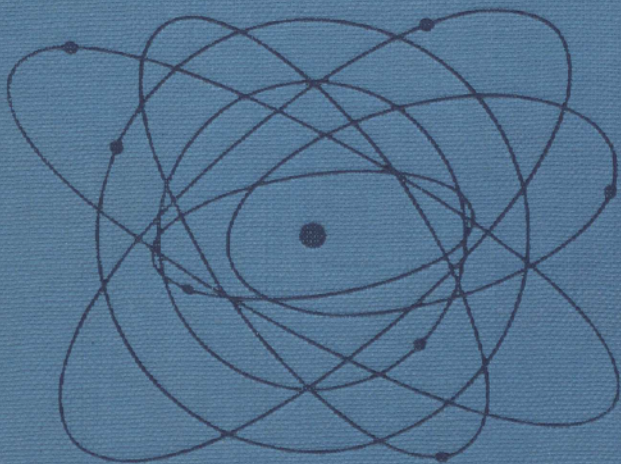


638 *E.B.: Atomkraft - Furcht und Hoffnung, Globus Verlag, Wien 1956, 251 S.*
(Übersetzungen: italienisch, polnisch, rumänisch).
Digitalisiert mit freundlicher Genehmigung des Verlages.



7461



x 30, 61 =



7461

ENGELBERT BRODA

ATOMKRAFT — FURCHT UND HOFFNUNG



7461

Dr. ENGELBERT BRODA

Professor an der Universität Wien

ATOMKRAFT— FURCHT UND HOFFNUNG

*Das Wesen der Kernenergie und die Möglichkeiten
ihrer Verwendung*



7461

GLOBUS VERLAG WIEN

Schutzumschlag von Kurt Lederhofer
Zeichnungen von Maria Wimmer

Alle Rechte vorbehalten
Copyright 1956 by Globus, Zeitungs-, Druck- und Verlagsanstalt,
Gesellschaft m. b. H., Wien
Gesamtausführung: Globus, Wien

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	9
--------------------	---

Aus der Geschichte der Atomistik

Die antike Atomistik	11
Die moderne Atomistik	14
Der Atomist Ludwig Boltzmann	16

Die Atome und ihre Bewegung

Die Atome in Gasen	19
Ausbreitung von Gasen / Ordnung und Unordnung	
Die Atome in Flüssigkeiten	24
Die Atome in Festkörpern	27

Der innere Aufbau der Atome

Das Planetenmodell des Atoms	31
Die Energiezustände der Atome	34
Das Periodische System der Elemente	36
Die Bildung chemischer Verbindungen	41

Die Atomkerne

Ladungszahl und Massenzahl; Proton und Neutron	47
Isotope	52
Stabile und instabile Atomkerne	54
Radioaktive Zerfallsreihen / Halbwertszeiten	
Methoden des Nachweises radioaktiver Strahlen	62
Nebelkammer / Ionenkammer / Zählrohr / Szintillationszähler	

Geologische Altersbestimmung durch Radioaktivität	67
Bleimethode / Helium- und Argonmethode	
Die Trennung von Isotopen	70
Künstliche Kernreaktionen	75
Die neue Alchimie	80
Historische Altersbestimmung durch Radioaktivität	81

Die Energien der Atomkerne

Die Analogie zwischen chemischen Reaktionen und Kernreaktionen	85
Das radioaktive Gleichgewicht	88
Welcher Rohstoff für Atomkernenergie?	92
Die Größe der Atomenergie	95
Vergleich mit chemischen Reaktionen / Die Energiequelle der Sonne	

Die Kernspaltung des Urans

Die Kernspaltung als neuartige Kernreaktion	99
Die Kernspaltung durch Neutronen	104
Die Wärmetönung der Kernspaltung	105
Die Neutronenemission bei der Kernspaltung; der Gedanke der Kettenreaktion	107
Der Begriff des Reproduktionsfaktors	110
Die Verlangsamung von Neutronen	113
Erster Nachweis einer potentiell divergenten und einer divergenten Kette	115

Der Aufbau von Reaktoren

Stufen des Reaktorenbaues	119
Reaktoren der Stufe I (energielose Reaktoren)	120
Reaktoren der Stufe II (Großversuchsanlagen)	124
Die Erzeugung von Radioelementen in Reaktoren	126
Reaktoren der Stufe III (Sprengstoffabriken und Kraftwerke)	126
Homogene Reaktoren	128

Die Entstehung von Plutonium	129
Die Züchtung von Spaltstoff	131
Nutzbare Wärme oder Sprengstoff?	133
Der Bau von Atomkraftwerken	137

Die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie

Sind die Rohstofflager hinreichend?	141
Die Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken	146
Perspektiven der Nutzbarmachung der Atomenergie	151
Atomenergie für Fahrzeuge?	153

Die Atombombe

Die Kettenreaktion mit prompten schnellen Neutronen ...	155
Bau und Verwendung der Uranbombe	156
Die Wirkung der Uranbombe	160
Bau und Verwendung der Wasserstoffbombe	166
Die Wirkung der Wasserstoffbombe	169
Kobaltbombe — Radioaktive Gifte als Waffen	171
Die Frage des Atomwaffenverbots	175
Das Dritte Reich und die Atomenergie	178

Die Verwendung von Radioelementen in Forschung und Technik

Methode der „radioaktiven Indikatoren“ („markierte Atome“)	183
Studium des Pflanzenbaues und des pflanzlichen Stoff- wechsels	186
Assimilation von Kohlensäure / Bildung technisch wichtiger Pflanzen- stoffe / Düngeprobleme	
Studium des tierischen und des menschlichen Stoffwechsels	193
Kreislaufprobleme / Speicherung von Elementen	
Erforschung des tierischen Lebensraumes	198
Anwendung markierter Atome in Bergbau und Industrie ...	200
Bergbau / Hüttenwesen / Metallkunde / Maschinenbau / Strömungsprobleme	

Anwendung der Radioaktivität auf Regeltechnik und Radiographie	208
Regeltechnik / Radiographie	
Einwirkung radioaktiver Strahlen auf Materie	213
Entladung von Elektrizität / Erzeugung von elektrischem Strom und von Licht / Durchführung chemischer Reaktionen / Bekämpfung von Schädlingen	
Die Radioaktivität in der Medizin	220
Vorbeugung und Diagnose / Therapie	

Einige Bemerkungen zum Problem Idealismus — Materialismus

Idealistische und materialistische Auffassung	227
Die Atome und der Entwicklungsgedanke	230
Namenverzeichnis	233
Zeittafel	241
Sachregister	243
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	249

Vorbemerkung

Die Atomenergie hat für das menschliche Leben im Guten und im Bösen große Bedeutung gewonnen. Diese Bedeutung wird noch gewaltig zunehmen. Die Fragen der Atomenergie werden die Menschheit auf ihrem ganzen ferneren Lebensweg begleiten. Es ist sehr wichtig, daß die Menschen schon heute bei ihren gesellschaftlichen, ja auch bei ihren individuellen Entscheidungen den Einfluß der Atomenergie in Rechnung setzen.

Das vorliegende Buch soll den Lesern helfen, sich in den Fragen der Atomenergie zurechtzufinden. Der Verfasser ist sich wohl bewußt, daß seine Leser verschiedenen Kreisen angehören und ein verschiedenes Maß an Interesse und Vorkenntnissen mitbringen. Dennoch soll dieses Buch allen Lesern etwas bringen.

Zu diesem Zweck wurden die Hauptabschnitte des Buches, soweit es irgend ging, voneinander unabhängig gestaltet. Daher muß der Leser das Buch nicht von A bis Z durchlesen, sondern er kann zunächst jene Abschnitte heraussuchen, die sein besonderes Interesse finden. Beispielsweise muß man, um sich über die Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken oder über die technische Anwendung radioaktiver Strahlen zu informieren, nicht unbedingt vorher den inneren Bau des Atoms studieren.

Die teilweise Unabhängigkeit der Abschnitte voneinander wird freilich um den Preis gewisser Wiederholungen erkauft, die es dem Leser ermöglichen, mitten im Buch mit der Lektüre zu beginnen.

Der Verfasser hofft, daß ihm sogar der ganz systematisch eingestellte Leser diese Wiederholungen gestatten wird.

Einige Abschnitte dieses Buches sind einem im Jahre 1950 erschienenen Büchlein des Verfassers entnommen, doch ist der größte Teil des Buches neu. Angesichts der sich überstürzenden Entwicklung der Atomforschung wäre es auch nicht anders möglich. Auch Erkenntnisse des Jahres 1955 — zum Beispiel die Berichte von der Genfer Atomenergiekonferenz — sind noch berücksichtigt.

Mag dieses Buch im Geiste *Pierre Curies* gelesen werden, der schon im Jahre 1903 in seinem Vortrag bei der Übernahme des Nobelpreises sagte:

Man vermag sich vorzustellen, daß das Radium in Verbrecherhänden sehr gefährlich werden könnte. So kann man sich fragen, ob die Menschheit von der Kenntnis der Geheimnisse der Natur Nutzen hat, ob sie reif ist, aus ihnen Vorteil zu ziehen, oder ob diese Kenntnis ihr schaden wird. Das Beispiel der Entdeckungen Nobels ist charakteristisch. Die Sprengstoffe haben die Menschen zu wundervollen Arbeiten befähigt. Gleichzeitig sind sie in den Händen der großen Verbrecher, die die Völker in den Krieg ziehen, ein schreckliches Mittel der Zerstörung. Ich aber gehöre zu jenen, die mit Nobel denken, daß die Menschen die neuen Entdeckungen mehr zum Guten als zum Bösen nutzen werden.

E. Broda

Aus der Geschichte der Atomistik

Die antike Atomistik

Der Gedanke, daß die Materie aus kleinsten Teilchen, den „Atomen“, bestehe, wurde zuerst von den griechischen Philosophen *Leukipp* und *Demokrit* aus Abdera gefaßt. Ihre Lehren, besonders die des (jüngeren) Demokrit, der um das Jahr 420 v. Chr. lebte, wurden später von dem Griechen *Epikur* und dem römischen Dichter *Lukrez* fortgeführt. *Farrington** beschreibt die Lehren des *Demokrit* in folgender Weise:

„Die Atomistik der Alten lehrte, daß die Welt aus zweierlei besteht: aus den Atomen und dem leeren Raum. Letzterer ist unendlich an Ausdehnung, die Atome sind unendlich an Zahl. Sie sind qualitativ einander gleich, dürften sich aber in Größe, Gestalt, Lage und Ordnung voneinander unterscheiden. Die Atome sind ungeschaffen und ewig, sie sind undurchdringlich, von gleicher Substanz und in sich selbst unveränderlich. In ihrer ständigen Bewegung im Raum haben sie durch mannigfachste Verbindungen und Trennungen die so wechselvolle prächtige Welt gebildet... Ein dem Atomismus ursprünglich eigentümliches Merkmal war die Behauptung der Existenz des Leeren, ein weiteres der Begriff des Atoms selbst. *Demokrits* ausgedehnte Atome waren räumlich teilbar, aber physikalisch unteilbar.“

„Auf Grund der Atomhypothese ließ sich die Frage der Verdauung und Einverleibung der Nährstoffe (die früheren griechischen

* „Greek Science“, London. Deutsche Übersetzung: „Die Wissenschaft der Griechen“, Wien 1947.

Denkern viel Kopfzerbrechen gemacht hatte, E. B.) unschwer klären. Denn man konnte ohne weiteres annehmen, daß Brot durch eine neue Mischung der Atome in Fleisch und Blut transformiert wird, ebenso wie etwa durch eine neue Anordnung der Buchstaben eine Tragödie in eine Komödie umgewandelt werden kann. Diese Art der Verdeutlichung ist für die Alten typisch. Durch solche Analogien suchten die alten Atomisten die Dürftigkeit ihrer Naturbeobachtung auszugleichen.“

„Demokrit lieferte auch zum Problem der Sinneswahrnehmung einen höchst wichtigen Beitrag. Nach ihm ist jedes wahrgenommene Ding nur eine bestimmte Anordnung von Atomen. Da diese sich nur durch Größe und Gestalt voneinander unterscheiden, so können die Qualitäten, die wir diesen Atomanordnungen zuschreiben, wie Farbe, Geschmack, Geräusch, Geruch und die getasteten Eigenschaften, nicht Qualitäten der Körper an sich sein. Vielmehr sind sie bloß Wirkungen, die die Körper auf unsere Sinnesorgane ausüben.“ (Hiezu *Abb. 1.*)

Über *Lukrez* schreibt der Wissenschaftshistoriker *Richard Ehrenfeld**:

„Aus dem imposanten Lehrgedicht des *Lucretius Carus* strömt eine Fülle von Beobachtungen, voll von überraschender Feinheit, entgegen, mit denen der Autor seine Ansicht vom Entstehen und Vergehen der Dinge durch Sammlung resp. Zerstreuung unsichtbarer Teilchen stützt. Gewänder, am brandenden Gestade ausgebreitet, werden feucht, sie trocknen wieder in der Sonne, ohne daß man die Wasserteilchen kommen oder gehen sah. Ein Ring wird, am Finger getragen, mit den Jahren dünner, der Fall des Tropfens höhlt den Stein, die Pflugschar verliert ihre Schärfe im Acker, und das Straßenpflaster nützt sich unter den Fußritten ab, ohne daß uns in jedem einzelnen Falle die verschwindenden Teilchen sichtbar würden. Die Natur wirkt daher durch unsichtbare Körper, die Atome.“

Wir werden in den folgenden Kapiteln sehen, wie die Richtigkeit

* „Grundriß der Entwicklungsgeschichte der chemischen Atomistik“, Heidelberg 1906.

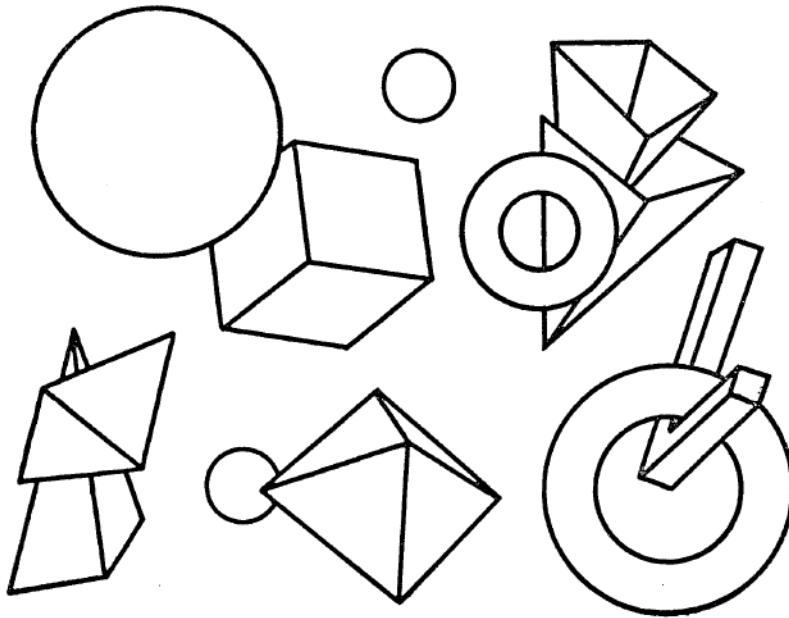


Abb. 1

Die „Atome“ des Demokrit

der genialen Vermutungen der alten Atomisten in unserer Zeit bewiesen werden konnte. Besonders großartig war *Demokrits* Gedanke, daß die Atome zwar räumlich, aber nicht physikalisch teilbar seien. Das heißt, nichts hindert uns, das von einem „Elementarteilchen“ eingenommene Volumen gedanklich weiter aufzuteilen. Wir können uns also etwa ein wie ein Apfel entzweigeschnittenes Elementarteilchen *vorstellen*, doch hätte eine solche Vorstellung keine Realität. Die Elementarteilchen sind in Wirklichkeit unzerlegbar.

Die unzerlegbaren Elementarteilchen sind allerdings nicht die Körperchen, die man seit dem 18. Jahrhundert Atome nennt. Nach dem heutigen Stand unseres Wissens (der seinerseits nicht endgültig sein muß) stellen die Elektronen, Protonen usw., in die sich die

— heute so bezeichneten — Atome aufspalten lassen, die wirklichen Elementarteilchen dar. Dieser Umstand ändert aber an der Richtigkeit der Vorstellung *Demokrits* grundsätzlich gar nichts.

Die moderne Atomistik

Demokrit und seine Nachfolger konnten der Atomistik nicht zum endgültigen Durchbruch verhelfen. Statt dessen stand bis vor ein- einhalb Jahrhunderten die „Kontinuum-Theorie“ der Materie im Vordergrund. Diese behauptete, daß die Materie nicht aus kleinen Teilchen (Atomen), sondern *kontinuierlich* aufgebaut sei. Man könne die Teilung der Materie, wenn man nur genügend gute Werkzeuge (scharfe Messer) besitzt, beliebig weit treiben. Die Hauptschuld, daß die Atomistik sich nicht durchsetzen konnte, trug das jahrtausendelange Fehlen einer echten, auf Experimente gegründeten Naturwissenschaft. Die Ideen *Demokrits* blieben geniale, aber doch unbewiesene Spekulationen.

Die wissenschaftliche Experimentierkunst entstand erst im Zusammenhang mit der Entwicklung der bürgerlichen Gesellschaft etwa seit Beginn der Neuzeit. Dem Experiment konnte der Weg erst gebahnt werden im Kampf gegen die mittelalterliche Auffassung, man müsse Naturforschung statt durch die Beobachtung der Natur durch die Lektüre der Schriften antiker Autoritäten, besonders des *Aristoteles*, und christlicher Autoren betreiben. Wie es mit der Naturwissenschaft unter den Bedingungen der feudalen Gesellschaft stand, sei dadurch veranschaulicht, daß *Nicolaus de Autricuria* in Paris, der den Gedanken vertrat, die Naturvorgänge beständen in der Verbindung und Trennung von Atomen, im Jahre 1348 öffentlich diesem Gedanken und darüber hinaus auch der tollkühnen Forderung abschwören mußte, Naturforschung überhaupt durch Beobachtung zu betreiben. Noch im Jahre 1624 setzte die Regierung der Könige von Frankreich auf die öffentliche Lehre der Atomistik die Todesstrafe*.

* Siehe *R. Ehrenfeld*, am angegebenen Ort.

Aber in dem Maße, wie sich das Bürgertum gegen den Adel und die Kirche durchsetzte, entwickelte sich echte Erkenntnis der Natur und daher auch die experimentelle Atomistik. *Giordano Bruno*, der freilich wegen seiner Naturlehren vom päpstlichen Ketzergericht 1600 verbrannt wurde, *Galileo Galilei*, der auch mit der Kirche in Konflikt geriet, und der große Chemiker *Robert Boyle* waren Verfechter der Atomlehre. Auch *Isaac Newton*, der im 17. Jahrhundert wirkte, nahm den Gedanken an Atome wieder auf. Er betrachtete die Atome als „feste, massive, harte und undurchdringliche kleinste Teilchen“. „Diese festen einfachen Teilchen sind unvergleichlich härter als alle porösen Körper, die sich aus ihnen zusammensetzen; sie sind so hart, daß sie sich niemals abnützen oder zerbrechen.“ Tiefe Einsicht in die Eigenschaften, die die Atome den Körpern verleihen, verdankt man auch *M. W. Lomonossow* (1711—1765), den man wegen seiner umfassenden Kenntnisse die „russische Universität“ nannte. Dieser Gelehrte betonte besonders, daß die Temperatur der Körper durch die Bewegungsenergie der Atome bestimmt ist. Auch der Jugoslawe *Boskowitsch* war ein Vorkämpfer der Atomistik.

Einen vollen Sieg erfocht die Atomistik aber erst im 19. Jahrhundert, als sich die Atomvorstellung für die *Chemie* als ganz unentbehrlich erwies. Gerade die chemische Industrie (Soda- und Schwefelsäureerzeugung, Eisenmetallurgie, Zement- und Zuckerfabrikation) nahm vor 150 Jahren einen besonderen Aufschwung. Das aufstrebende Bürgertum, das im Interesse des Gewinnes die industrielle Produktion *rationell* betreiben wollte, forderte eine leistungsfähige chemische Theorie. Eine solche Theorie konnte aber nur auf Grundlage der Atomistik geschaffen werden. Daher wurden die jahrtausendalten Widerstände gegen die Atomlehre — zumindest auf dem Gebiete der Chemie — fast mit einem Schlage beiseite geschoben. Die von *John Dalton*, einem Sohn der industriellen Zivilisation, entwickelte chemische Atomlehre feierte einen großen Triumph. *Dalton*, der ursprünglich Schullehrer war, wirkte in Manchester, dem Hauptsitz der Textilindustrie.

Es ist bemerkenswert, daß der Widerstand gegen die Atomistik in der *Physik*, die zu jener Zeit weniger eng mit der Industrie verknüpft war, nicht so leicht zu brechen war. So mancher Physiker

des 19. Jahrhunderts blieb zeitlebens ein Gegner der Atomlehre. Heute ist es uns schwer verständlich, wie diese Männer die Anerkennung der Atome in der Chemie mit ihrer Leugnung in der Physik verbinden konnten. Freilich gingen dann immer mehr Physiker von atomistischen Vorstellungen aus. Zu ihnen gehörte der große Schotte *Clerk Maxwell*, dem man auch die moderne elektromagnetische Theorie des Lichtes verdankt. Der bedeutendste Vorkämpfer der Atomistik unter den Physikern des vorigen Jahrhunderts war einer der größten Geister aller Zeiten, der Österreicher *Ludwig Boltzmann* (siehe *Bildtafel* bei Seite 64).

Der Atomist Ludwig Boltzmann

In *Boltzmanns* „Populären Schriften“, einem großartigen und noch immer äußerst lesenswerten Werk, gibt es ein Kapitel, das die bezeichnende Überschrift trägt „Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft“. An einer anderen Stelle des Buches heißt es: „Phantastischer Spekulationen über die nähere Beschaffenheit der Atome müssen wir uns enthalten. Aber daß gewisse Diskontinuitäten im inneren Bau der Materie vorhanden sind, das wird für immer eine der wichtigsten Tatsachen der Naturwissenschaften bleiben. Eine der größten wissenschaftlichen Entdeckungen — die der Größenordnung der Dimensionen, an welche die Diskontinuitäten gebunden sind (gemeint ist die Größe der Atome, E. B.) — ist von niemandem anderen als unserem *Loschmidt* gemacht worden. Daran läßt sich einmal nichts mäkeln. Entschuldigen Sie, daß ich es so scharf hinsage, es ist einfach unbestreitbar wahr.“ (Heute sind Untersuchungen über den Atombau freilich keine phantastischen Spekulationen mehr! Im Gegenteil, wir wissen über ihn sehr genau Bescheid.)

An anderer Stelle: „Die mannigfaltigsten Tatsachen der Wärmetheorie, der Chemie, der Kristallographie weisen darauf hin, daß in den dem Anschein nach kontinuierlichen Körpern keineswegs der Raum unterschiedslos und gleichförmig mit Materie erfüllt ist. Es

befinden sich vielmehr darin ungemein zahlreiche Einzelwesen der Moleküle und Atome, welche zwar außerordentlich, aber nicht im mathematischen Sinn unendlich klein sind. Man kann ihre Größe nach verschiedenen, sehr disparaten (verschiedenartigen) Methoden berechnen und erhält immer das gleiche Resultat.“ Oder wieder: „Ich behaupte, daß eine Theorie (gemeint ist die Atomlehre, E. B.), welche Selbständiges, in anderer Weise nicht Gewinnbares leistet, für welche obendrein so viele andere physikalische, chemische und kristallographische Tatsachen sprechen, nicht zu bekämpfen, sondern fortzupflegen ist.“

Boltzmann konnte sich auch nicht enthalten, bei seiner Totenrede auf seinen Freund *Loschmidt* an der Universität zu erklären: „Nun ist *Loschmidts* Leib in seine Atome zerfallen; in wie viele, können wir aus den von ihm gewonnenen Prinzipien berechnen. Ich habe, damit es in einer Rede zu Ehren eines Experimentalphysikers nicht an jeder Demonstration fehle, die betreffende Zahl dort an die Tafel schreiben lassen.“ Die angeschriebene Zahl war 10 Quadrillionen; sie war mit allen 25 Nullen hingeschrieben worden.

Indem *Boltzmann* auf die Pionierarbeiten von *Maxwell* aufbaute, gelang ihm die theoretische Aufklärung vieler Eigenschaften der Materie, besonders der Gase. Auch konnte *Boltzmann* auf der Grundlage der Atomlehre die wichtigsten Gesetze der Wärmelehre deuten und der später von *Planck* aufgestellten Quantentheorie den Weg bereiten. Die *Boltzmannschen* Erkenntnisse haben eine Reihe von Wissensgebieten von der Astronomie über die Physik und Chemie (einschließlich der technischen Chemie) bis zur Biologie in außerordentlicher Weise befruchtet. *Maxwell* und *Boltzmann* waren übrigens diejenigen Physiker, die auf den jungen *Einstein* den stärksten Einfluß übten. *Boltzmann* war auch philosophisch sehr interessiert*.

Allerdings wurde selbst zu Ende des 19. Jahrhunderts noch immer Widerspruch gegen die Atomistik laut; so glaubte der bekannte

* Der Autor des vorliegenden Buches hat eine Darstellung des Lebens und Werkes *Boltzmanns* verfaßt: „*Ludwig Boltzmann. Mensch — Physiker — Philosoph*“ (Verlag Deuticke, Wien, 1955). Geleitwort von *Hans Thirring*.

Wiener Physiker *Ernst Mach* (1838—1916) nicht an die Atome. *Machs* Auffassungen drangen aber nicht durch. Nachdem ihm bestimmte Erscheinungen der Radioaktivität vorgeführt wurden, bekannte jedoch auch er sich — im Alter von 70 Jahren — zur Existenz der Atome. Im 20. Jahrhundert ist die Atomistik Gemeingut der Wissenschaft in der ganzen Welt geworden.

Die Atome und ihre Bewegung

Die Atome in Gasen

Ausbreitung von Gasen

Gase sind dadurch gekennzeichnet, daß sie sich spontan über jedes Volumen ausbreiten, das ihnen zur Verfügung gestellt wird (*Abb. 2*).

Wenn z. B. (Fall A) der Hahn geöffnet wird, der ein gasgefülltes Gefäß I mit einem leergepumpten (evakuierten) Gefäß II verbindet, so strömt das Gas mit großer Geschwindigkeit in das leere Gefäß ein. Auch wenn das Gefäß II nicht leer (Fall B), sondern mit einem von dem ersten verschiedenen Gas unter gleichem Druck gefüllt ist, findet Ausbreitung des Gases aus Gefäß I ins zweite Gefäß statt und umgekehrt. Dies stellt man in diesem Fall z. B. durch chemische Analyse leicht fest. Im Rahmen der atomistischen Vorstellung nimmt man also an, daß Atome aus Gefäß I nach Gefäß II gewandert sind. Man muß dabei konsequenterweise annehmen, daß eine entsprechende Vermischung der beiden Gase auch dann stattfindet (Fall C), wenn ursprünglich beide Gefäße mit dem gleichen Gas unter gleichem Druck gefüllt waren. Manche Atome fliegen in diesem Fall aus Gefäß I in Gefäß II, andere gleichartige Atome aus Gefäß II in Gefäß I. Da allerdings das Füllgas in beiden Gefäßen das gleiche war, bemerkt ein Beobachter keinerlei Veränderung, da er ja die einzelnen Atome des gleichen Gases in keiner Weise voneinander unterscheiden kann. Die Ausbreitung des Gases, die in der Physik als *Diffusion* bekannt ist, ist also in diesem Fall zwar nicht nachzuweisen, findet aber zweifellos statt.

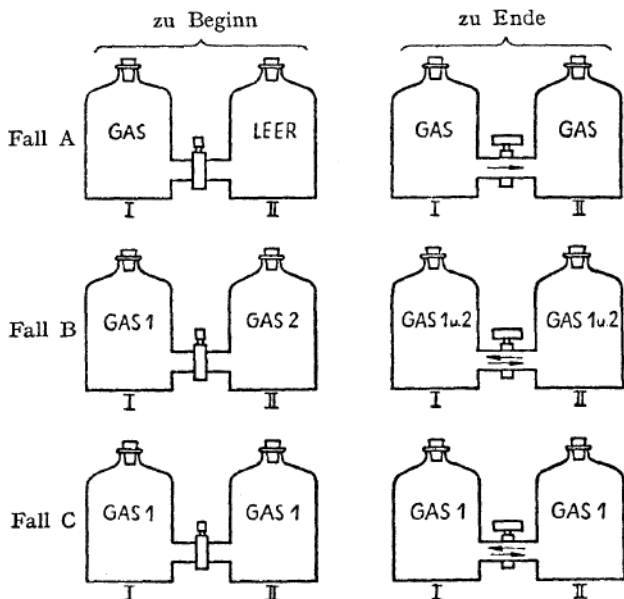


Abb. 2

Diffusion bei Gasen

Man schließt aus der Leichtigkeit, mit der die Diffusion vor sich geht, daß die Teilchen im Gas, eben die Atome, nicht durch starke Kräfte an die Gesamtheit der Gasmasse gebunden sein können. Sie können sich von der Masse, die das ursprüngliche Volumen erfüllt hat, leicht „losreißen“, um das ganze nun verfügbare Volumen zu erfüllen. Allerdings folgt aus der Leichtigkeit der Diffusion noch nicht, daß in einem Gasvolumen die Atome sich sämtlich einzeln (isoliert) bewegen. Leichte Diffusion muß z. B. auch erwartet werden, wenn man annimmt, daß immer je zwei Atome miteinander eng verbunden sind, daß aber diese aus zwei Atomen bestehenden Einheiten von dem Rest des Gases unabhängig sind. Tatsächlich weiß man, daß in den meisten Gasen solche Verbindungen aus zwei oder mehreren Atomen vorliegen. Sie werden als *Moleküle* bezeichnet. Zwischen

diesen Molekülen und dem Rest des Gases gibt es also fast keine Kraftwirkungen.

Zum Beispiel sind die Teilchen im *Kohlendioxid*gas, die sich gemeinsam und unabhängig vom Rest des Gases bewegen, aus Molekülen zusammengesetzt; dabei besteht in diesem Falle jedes einzelne Molekül aus je einem Atom Kohlenstoff und zwei Atomen Sauerstoff. In anderen Gasen bestehen die Moleküle aus mehreren Atomen der gleichen Art. So enthalten die Moleküle des *Sauerstoff*gases, das die tierische und die pflanzliche Atmung unterhält, je zwei Sauerstoffatome. Es gibt aber auch Gase, in denen die frei beweglichen Teilchen wirklich nur aus je einem Atom bestehen. In solchen Gasen fallen also Atom- und Molekülbegriff zusammen. Ein derartiges Gas ist das *Argon*, das zu 1% in der Luft vorkommt und zur Füllung von Glühlampen verwendet wird. Ein anderes Gas dieser Art ist das Gas, das bei der Verdunstung von *Quecksilber* entsteht, also der Quecksilberdampf. *Dämpfe* sind nichts anderes als Gase, die durch Verdampfung oder Verdunstung aus Flüssigkeiten entstehen und sich durch Temperaturerniedrigung wieder verflüssigen lassen. Jedes Gas läßt sich letzten Endes als Dampf auffassen, denn bei genügend tiefer Temperatur wird jedes Gas verflüssigt.

Wir haben oben erwähnt, daß die Diffusion eines Gases in ein Volumen, das von Gas gleicher Art erfüllt ist (die sogenannte „Selbstdiffusion“), experimentell nicht nachzuweisen ist. Dies trifft allerdings nur unter der Voraussetzung zu, daß das Gas in den beiden Gefäßen ursprünglich gleichen *Druck* besessen hat. Der Druck eines Gases drückt sein „Bestreben“ nach Ausbreitung aus. Es ist verständlich, daß dieses Bestreben um so größer ist, je mehr Gasmoleküle in einen bestimmten Raum gepfercht sind. Der Gasdruck ist also unter sonst gleichen Verhältnissen ein Maß für die Gaskonzentration. Wenn daher der Verbindungshahn zwischen zwei Gefäßen geöffnet wird, die mit dem gleichen, aber unter verschiedenem Druck stehenden Gas erfüllt sind, muß ein Ausgleich des Druckes stattfinden. Dieser Ausgleich kann sich aber nur in der Weise vollziehen, daß aus dem Hochdruckgefäß mehr Moleküle als aus dem Niederdruckgefäß auswandern. In diesem Falle beobachtet man also einen Nettoeffekt,

und die Wanderung ist auch bei chemischer Gleichheit der beiden Füllgase ohne weiteres nachzuweisen.

Die Schnelligkeit des Druckausgleichs zeigt, daß die Moleküle sich von vornherein, wie die Einzelindividuen in einem Mückenschwarm, in lebhafter Bewegung befinden müssen. Solange sie in ein Gefäß eingeschlossen sind, stoßen sie immer wieder aneinander und an die Wände an, von denen sie wie elastische Gummibälle abprallen. Sobald die Scheidewand gegen einen leeren Raum fällt (der Hahn geöffnet wird), treffen die Moleküle, die sich zufällig gerade in der Richtung der Öffnung bewegen, auf kein Hindernis mehr: sie können sich daher über den ursprünglich leeren Raum verteilen.

Ordnung und Unordnung

Es besteht allerdings kein Grund zu der Annahme, daß alle Moleküle in einem Gasvolumen gleiche Geschwindigkeit besitzen. Im Gegenteil: bei ihrer regellosen Bewegung müssen die Atome bzw. die Moleküle ständig durch Stöße aufeinander Bewegungsenergie übertragen. Daher werden in jedem Augenblick zufällig manche der Atome mehr Energie, andere wieder weniger Energie als der Durchschnitt besitzen. Unter Umständen können also Moleküle, die in einem Augenblick gerade besonders energiereich (also rasch bewegt) waren, im nächsten Augenblick besonders energiearm sein. Die verschiedenen Bewegungsenergien sind über die Moleküle rein zufällig verteilt. Die Verteilung wurde von *Boltzmann* berechnet. Man kann die Moleküle mit den Automobilen in einer großen Stadt vergleichen. Ein Auto wird sich manchmal schnell, manchmal langsam bewegen, eventuell auch ganz haltmachen. Aber vorausgesetzt, daß von vornherein die Zahl der Autos groß genug ist, wird stets ein gewisser Prozentsatz von Autos vorhanden sein, die sich zufällig mit 20, und ein anderer Prozentsatz von Wagen, die sich ebenso zufällig gerade mit 30 Stundenkilometer bewegen — obwohl doch die Bewegungen der einzelnen Autos ganz vom „Spiel des Zufalls“ abhängen. Man sagt, die Geschwindigkeiten sind *statistisch* bestimmt.

Ein Unterschied zwischen den Bewegungen der Moleküle und der

Autos liegt allerdings vor. Die Moleküle ändern ihre Geschwindigkeit dadurch, daß sie *aufeinander* Energie übertragen. Eine solche Übertragung erfolgt bei den Autos nur selten — nämlich dann, wenn sie zusammenstoßen. Sonst beziehen die Autos ihre Energie aus ihrem inneren Mechanismus (Motor) und verlieren sie wieder durch Reibung und durch das Bremsen. Die Energie geht dabei verloren, d. h. sie dient der Erwärmung der Straße oder der Bremsen und wird entwertet. Moleküle können nicht reiben oder gebremst werden, ohne anderen Molekülen Energie zu übertragen. Denn woran sonst als an Molekülen könnten sich Moleküle reiben?

Auch die *Bewegungsrichtung* der Moleküle ist rein statistisch bestimmt, das heißt, ihre Bewegung ist „ungeordnet“. Zum Beispiel prallen in jeder Sekunde Trillionen Luftmoleküle an uns an. Da aber die Anpralle aus allen Richtungen erfolgen, hebt ihre Wirkung sich auf. Das Bombardement bleibt zum Glück unbemerkt. Freilich, wenn wir von einem Orkan umgerissen werden, so heißt das nichts anderes, als daß auf der Seite des Winddruckes mehr Luftmoleküle auf uns geprallt sind. Aber selbst bei dem stärksten vorkommenden Winddruck ist die Anprallzahl auf beiden Seiten des Körpers immer noch verhältnismäßig sehr wenig verschieden.

Die *Ungeordnetheit* der Bewegung ist die Ursache dafür, daß der Gehalt der Materie, z. B. der Weltmeere, an Bewegungsenergie nicht zur Erzeugung von nutzbarer Energie herangezogen werden kann. Man kann leicht ausrechnen, daß die Bewegungsenergie der Moleküle in jedem Kubikmeter Meerwasser einer Arbeitsleistung von vielen Kilowattstunden entspricht. Diese Energie läßt sich aber nicht zum Antrieb von Maschinen verwenden. Eine Turbinenschaufel, die in ruhendes Wasser eintaucht, erhält zwar ständig viele Stöße der Moleküle, aber die Stöße von allen Seiten halten einander die Waage.

Die Bewegung der Gasmoleküle ist um so lebhafter, je höher ihre *Temperatur* ist. Wenn die Bewegung heftiger wird, wird auch der Anprall der Moleküle an die Gefäßwände heftiger: Der Druck eines Gases vergrößert sich mit steigender Temperatur. Auch der gesamte Gehalt einer Gasmasse an Bewegungsenergie, d. h. an Energie überhaupt, erhöht sich mit der Temperatur. Allerdings bleibt die statistische Verteilung der Geschwindigkeiten aufrecht. Auch die

Ungeordnetheit der Bewegungsrichtungen bleibt bei jeder Temperatur erhalten. Nur die *mittlere Geschwindigkeit* der Moleküle vergrößert sich bei Erwärmung.

Die schlagendste Rechtfertigung der Atomistik liegt darin, daß alle Angaben, die wir hier in allgemeiner Form gemacht haben, auch *zahlenmäßig unterbaut* sind*. Die wichtigsten Daten sind die folgenden: Der Durchmesser eines Wasserstoffatoms beträgt $\frac{1^{06}}{100.000.000}$ ($= 1.06 \times 10^{-8}$) cm, sein Volumen ungefähr ein Quadrillionstel ($= 10^{-24}$) cm^3 . Andere Atome sind größer; zum Beispiel ist der Durchmesser eines Atoms des Urans um ein Mehrfaches größer. Die durchschnittliche Geschwindigkeit eines Wasserstoffmoleküls (das ebenso wie das Sauerstoffmolekül aus zwei Atomen besteht) beträgt bei Zimmertemperatur 1.5 Kilometer, bei der Temperatur der Sonnenoberfläche (6000^0) 7 Kilometer und bei der Temperatur des Sonneninneren (20 Millionen Grad) 400 Kilometer pro Sekunde. Beim absoluten Nullpunkt der Temperatur (-273.1^0 C), der freilich unerreichbar ist, wäre die Geschwindigkeit und damit auch die Bewegungsenergie des Wasserstoffmoleküls Null. In einem Kubikzentimeter Wasserstoffgas, das unter atmosphärischem Druck steht, befinden sich 30 Trillionen ($= 3 \times 10^{19}$) Wasserstoffmoleküle. Jedes Molekül erleidet in der Sekunde 14.000.000.000 ($= 1.4 \times 10^{10}$) Zusammenstöße mit anderen Molekülen. Zwischen den einzelnen Zusammenstößen kann es im Durchschnitt einen Weg von 0.000012 ($= 1.2 \times 10^{-5}$) cm zurücklegen. Dieser Weg heißt *mittlere freie Weglänge*.

Die Atome in Flüssigkeiten

Für Flüssigkeiten trifft, im Gegensatz zu den Gasen, die Voraussetzung nicht mehr zu, daß die Kräfte zwischen den Molekülen unbedeutend sind. Im Gegenteil: der Anblick jedes Tropfens belehrt uns,

* Im folgenden werden zahlenmäßige Angaben gewöhnlich sowohl durch echte Brüche als auch (wie in der Wissenschaft üblich) durch Zehnerpotenzen ausgedrückt. Zur Umrechnung: $10 = 10^1$, $100 = 10^2$, $1000 = 10^3$; $0.1 = 10^{-1}$, $0.01 = 10^{-2}$, $0.001 = 10^{-3}$ usw.

daß eine starke Tendenz der Moleküle zum Zusammenhalt (Kohäsion) besteht. Allerdings setzt sich diese Tendenz noch nicht so stark wie bei den Festkörpern durch, bei denen die Anziehungskräfte dazu führen, daß die Moleküle zueinander eine starre Mittellage einnehmen. Die Fließfähigkeit zeigt, daß die Moleküle sich immerhin noch aneinander vorbeischieben können. Sie setzen also einer Gestaltänderung der Flüssigkeit nur geringen Widerstand entgegen — vorausgesetzt, daß sie nicht zu schnell erfolgt. (Deshalb springe man lieber nicht so ins Wasser, daß man mit dem Bauch aufklatscht!) Doch „wollen“ die Moleküle bei der Formänderung der Flüssigkeit nicht den gegenseitigen Kontakt verlieren. Wenn man sie dazu zwingen will, also die Moleküle radikal voneinander trennen will, muß man die Flüssigkeit verdampfen, d. h. in Gas verwandeln. Dazu ist Energie- (Wärme-) Zufuhr nötig.

Die Kohäsion bewirkt, daß Flüssigkeiten, im Gegensatz zu Gasen, sich nicht über den ganzen verfügbaren Raum ausbreiten. Vielmehr behalten sie ihr Volumen unter allen Umständen — also auch unter verändertem Druck — im wesentlichen bei. Infolgedessen kann man auch von einem festgelegten *mittleren Abstand* der Moleküle voneinander sprechen. Dieser beträgt z. B. in flüssigem Wasserstoff ungefähr $\frac{4}{100,000,000}$ ($= 4 \times 10^{-8}$) cm, in Wasser (Abstand der Wasserstoffatome) $\frac{2.5}{100,000,000}$ ($= 2.5 \times 10^{-8}$) cm. (Zum Vergleich: Dieser mittlere Abstand beträgt in Wasserstoffgas bei Atmosphärendruck etwa $\frac{33}{100,000,000}$ [$= 3.3 \times 10^{-7}$] cm, kann aber je nach dem Druck jeden nur möglichen Wert annehmen.) Man erkennt also, daß der mittlere Abstand in Flüssigkeiten ungefähr mit dem Durchmesser der Atome (siehe Seite 24) vergleichbar ist. Er ist, wie man auch sagt, „von derselben Größenordnung“.

Bei gleicher Temperatur bewegen sich die Moleküle einer Flüssigkeit mit einer Geschwindigkeit, die von der Geschwindigkeit der Gasmoleküle nicht allzusehr verschieden ist. Da sich die Flüssigkeitsmoleküle aber wegen der Kohäsion nicht frei bewegen können, muß man annehmen, daß sie ihre Bewegungsrichtung immer ändern, sobald ihnen die Gefahr droht, sich von den Nachbarmolekülen zu weit zu entfernen. Sie werden also durch die Anziehungskräfte der Nachbarn zurückgeholt. Infolgedessen werden die Flüssigkeitsmoleküle im

wesentlichen eine Hin- und Herbewegung, eine *Pendelbewegung* um gewisse Lagen, ausführen. Diese Lagen verändern sich relativ langsam mit der Zeit.

In Flüssigkeiten läßt sich eine sehr interessante Erscheinung beobachten, die das Walten der Moleküle wohl am anschaulichsten zeigt. Im Jahre 1827 beobachtete der Botaniker *Brown*, daß winzig kleine, aber im Mikroskop noch sichtbare Teilchen, z. B. Harzteilchen, die in einer Flüssigkeit aufgeschwemmt sind, ständig eine sonderbare, zittrig-tanzende Bewegung vollführen. Etwa 80 Jahre später wurde durch *Albert Einstein* und den Polen *Smoluchowski* die Erklärung geliefert. Sie gingen von der Überlegung aus, daß infolge der Kleinheit der Teilchen die Zahl der Stöße, die sie durch die Moleküle der Flüssigkeit unaufhörlich empfangen, pro Zeiteinheit schon ziemlich klein sein muß. Daher werden die Wirkungen der Stöße im allgemeinen einander nicht mehr die Waage halten können. Ein solches Teilchen wird „zufällig“ in der einen Sekunde in diese, in der nächsten Sekunde in jene Richtung geworfen werden, also eine Zickzackbewegung ausführen. Auf Grund der Molekulartheorie lassen sich die Gesetze der *Brownschen Bewegung* auch zahlenmäßig ableiten. Derartige „Schwankungserscheinungen“ waren theoretisch von *Boltzmann* vorausgesehen worden, doch war diesem die *Brownsche Bewegung* vermutlich nicht bekannt.

Die *Schwankungserscheinungen* bildeten — abgesehen von der in jenen Jahren erst am Beginn ihrer Erforschung stehenden Erscheinungen der Radioaktivität — wohl den klarsten Beweis für die Richtigkeit der Atomlehre. Die Lehre vom *kontinuierlichen* Aufbau der Materie wäre nie und nimmer imstande gewesen, die Schwankungen richtig zu deuten.

Im wissenschaftlichen Sinne gehört merkwürdigerweise auch eine Körperklasse zu den Flüssigkeiten, die man im täglichen Leben zu den Festkörpern rechnet: die *Gläser*. Gläser (zu ihnen gehören theoretisch auch die meisten *plastischen Massen*) sind nichts anderes als sehr zähe Flüssigkeiten, die erst bei stark erhöhter Temperatur leichtflüssig werden. Die Gläser haben mit den gewöhnlichen, weniger zähen Flüssigkeiten die Eigenschaft gemein, daß ihre Atome, im Gegensatz zu den Festkörpern, keine starre Ordnung zeigen.

Die Atome in Festkörpern

Der feste Körper weist jene Anordnung der Materieteilchen auf, die der Anordnung der Moleküle im Gas extrem entgegengesetzt ist. Während im Gas keine nennenswerten Kräfte zwischen den Molekülen wirken, sind die Kräfte im Festkörper so stark, daß alle Moleküle in ganz bestimmte Lagen gezwungen sind. Es sind die Plätze, bei deren Einnahme durch die Moleküle die Kräfte zwischen ihnen am besten abgesättigt sind. Während also das Volumen eines Gases von den Umständen abhängt, ist das Volumen der festen Körper (ebenso wie der Flüssigkeiten) festgelegt. Der feste Körper zeigt deshalb (ebenso wie die Flüssigkeit) nicht das Ausbreitungsbestreben der Gase. Der entscheidende Unterschied der Festkörper gegenüber den Flüssigkeiten wiederum liegt darin, daß die letzteren Formänderungen unterliegen. Die Orte der Moleküle einer Flüssigkeit sind also nicht festgelegt, während die Moleküle im Festkörper normalerweise an ihren regelmäßig angeordneten Plätzen bleiben müssen.

Man spricht davon, daß die Moleküle in einem Festkörper ein *Gitter* bilden — ähnlich wie in einem Gartengitter gewisse Anordnungen der Bestandteile (z. B. Stäbe oder Zacken) regelmäßig wiederkehren. In einem einfachen Gitter eines Festkörpers sind alle Abstände zwischen den Lagen der Teilchen (den *Gitterpunkten*) gleich. Zum Beispiel beträgt im Gitter des Kochsalzes (Chlornatrium) der kürzeste Abstand zwischen den Teilchenmittelpunkten (es handelt sich um die elektrisch geladenen Atome des Natriums und des Chlors) $\frac{2^8}{100.000.000}$ ($= 2,8 \times 10^{-8}$) cm. In *Abb. 3* ist das würfelförmige Raumgitter des Kochsalzes schematisch dargestellt. Während hier die Chlor- und die Natrium-Atome der Anschaulichkeit halber als Punkte gezeichnet sind, ist es in Wirklichkeit so, daß die positiv geladenen Natrium- und die negativ geladenen Chlor-Atome (Natrium- bzw. Chlor-Ionen) infolge ihrer elektrischen Anziehung einander berühren, wie es in *Abb. 4* dargestellt ist. Andere Stoffe bilden kompliziertere Gitter. Einen festen Körper, dessen Teilchen in größeren Bereichen des Raumes in einem zusammenhängenden Gitter angeordnet sind, bezeichnet man als *Kristall*.

Wenn der Bereich, innerhalb dessen die regelmäßige Anordnung

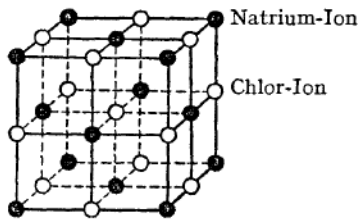


Abb. 3

*Raumgitter des
Kochsalzkristalls
(schematisiert)*

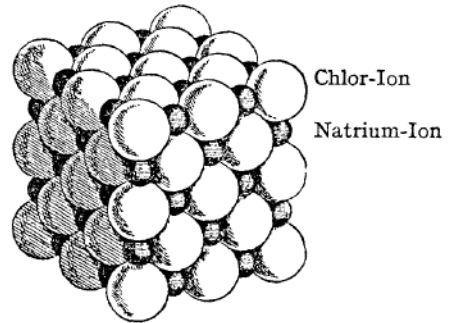


Abb. 4

*Raumgitter des Kochsalzkristalls
(im natürlichen Größenverhältnis)*

in einem Gitter ununterbrochen fortgeht, sehr groß ist, erkennt man die Regelmäßigkeit, also die Kristallstruktur, schon an der äußeren Form. Quarzkristalle (Bergkristall) oder die glitzernden Kriställchen des Zuckers sind Beispiele dafür. Freilich sind Kristalle oft so klein, daß sie mit freiem Auge, ja sogar mit dem Mikroskop nicht mehr wahrnehmbar sind. Dann läßt sich die kristalline Struktur noch immer mit Hilfe der Röntgenstrahlen nachweisen. Fast alle Körper, die man gemeinhin als „fest“ bezeichnet, haben sich auf diese Weise als kristallin erwiesen, z. B. die Salze, die Metalle und ihre Legierungen, viele organische Stoffe, darunter sogar die Eiweißkörper und natürlich vorkommende Textilfasern, wie Wolle, Seide und Baumwolle. Dagegen sind die Gläser und die meisten Kunststoffe (plastischen Massen) nicht kristallin (siehe Seite 26).

Wenn die Teilchen (Moleküle oder Atome) in den Kristallen an bestimmte Lagen gebunden sind, so bedeutet das freilich nicht, daß sie in Bewegungslosigkeit verharren. Sie haben vielmehr, ebenso wie die Moleküle der Gase und der Flüssigkeiten, Bewegungsenergie. Die Teilchen *schwingen* um ihre Ruhelagen. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Schwingung an Heftigkeit zu, so daß schließlich die Regelmäßigkeit und damit das Kristallgitter zerstört wird: der Kristall

„schmilzt“. Die Schwingungen finden, wie im vorhergehenden Abschnitt betont wurde, auch in der Flüssigkeit (Schmelze) statt.

Die *Anzahl der Schwingungen*, die ein Atom oder ein Molekül im Kristall oder in einer Flüssigkeit vollführt, hängt von den Umständen ab, beträgt aber allgemein viele Billionen pro Sekunde. Wenn Moleküle — nicht Atome — den Kristall aufbauen (z. B. Zuckermoleküle), so schwingen die Moleküle als Ganze im Kristallgitter, aber außerdem schwingen auch die einzelnen Atome in den Molekülen gegeneinander. Unter Umständen ist es so, daß die Moleküle im Kristallgitter nicht nur *schwingen*, sondern sich außerdem um ihre eigene Achse *drehen*.

Der innere Aufbau der Atome

Das Planetenmodell des Atoms

Die Theorie der Gase, Flüssigkeiten und Festkörper, die wir auf Seite 19 ff. skizziert haben, nimmt auf den *inneren Aufbau* der Atome wenig Rücksicht. Tatsächlich wurde sie im wesentlichen schon im Laufe des 19. Jahrhunderts ausgebaut, als über den Innenbau der Atome nichts bekannt war. Die Atome wurden mit genügendem Erfolg im Geltungsbereich der Theorie einfach als harte elastische Kügelchen aufgefaßt.

Die heute gültige Theorie des inneren Aufbaues des Atoms wurde seit dem Jahre 1911 von *Ernest Rutherford* (siehe *Bildtafel* bei Seite 65 oben) und *Niels Bohr* entwickelt. Sie gibt ein überraschend anschauliches Bild. Gleichzeitig aber — und das ist der Prüfstein jeder naturwissenschaftlichen Theorie — macht sie zahlenmäßige Voraussagen, die mit der Erfahrung in Einklang stehen. Die Theorie wurde in den Zwanzigerjahren durch die Wellen- und die Quantenmechanik verfeinert, doch sind ihre Grundgedanken erhalten geblieben. Im Zusammenhang der vorliegenden Betrachtungen werden wir mit dem einfachen Modell auskommen.

Die *Bohr-Rutherfordsche* Theorie nimmt an, daß das Atom aus zwei Teilen besteht. *Im Zentrum des Atoms ruht der winzig kleine Atomkern; um ihn herum kreisen, wie Planeten um die Sonne, in relativ sehr großen Abständen die Elektronen, die in ihrer Gesamtheit als „Atomhülle“ bezeichnet werden.* In Anbetracht der Winzigkeit dieser das Atom aufbauenden Teilchen (Atomkern und Hüllenelektronen) und der im Verhältnis dazu ungeheuer großen Zwischenräume, die die Atombestandteile voneinander trennen, kann man in der Ausdrucksweise

des gewöhnlichen Sprachgebrauchs sagen, daß der größte Teil des Atomvolumens *leer* ist.

Im kosmischen Planetensystem werden die Planeten durch die *Schwerkraft*, d. h. durch die Anziehungskraft der Sonne, festgehalten. Die Schwerkraft ist eine allgemeine Eigenschaft aller Materie und von deren elektrischer Ladung völlig unabhängig. Die Elektronen sind hingegen nicht durch die Schwerkraft an den Atomkern gebunden; die durch die Schwerkraft bewirkte Anziehung wäre viel zu klein. Vielmehr wirken innerhalb des Atoms *elektrische Anziehungskräfte*, indem der positiv geladene Atomkern und die negativ geladenen Elektronen der Atomhülle einander anziehen. Normalerweise ist die (negative) Gesamtladung der Hülle genau gleich der (positiven) Ladung des Kerns, so daß das Atom als Ganzes nach außen hin elektrisch neutral erscheint.

Die elektrische Ladung des Kerns kann nicht jeden beliebigen Wert annehmen, sondern sie ist stets ein einfaches ganzzahliges Vielfaches der elektrischen *Elementarladung*, die 0.0000000000000000016 ($= 1.6 \times 10^{-19}$) Ampere-Sekunden (Coulomb) beträgt. Es gibt also Atomkerne mit 1, 2, 3, 4 usw. (positiven) Elementarladungen. Die Ladung jedes einzelnen Elektrons besteht stets bloß aus einer einzigen Elementarladung — nur mit umgekehrtem Vorzeichen. Ein einfach (positiv) geladener Kern benötigt also gerade *ein* kreisendes (negativ geladenes) Elektron, wenn das Gesamtatom elektrisch neutral bleiben soll; ein zweifach geladener Kern benötigt zwei Elektronen usw. Die Ladung des Kerns wird ausgedrückt durch die *Kernladungszahl*, die auch *Ordnungszahl* oder *Atomnummer* genannt wird.

Jedes Elektron umkreist den Atomkern auf einer ganz bestimmten kreisförmigen oder elliptischen Bahn. (In der verfeinerten Theorie muß man allerdings die ebenen Bahnen durch räumliche „Bahnen“ ersetzen.) Nicht in jeder beliebigen Entfernung vom Kern können Elektronenbahnen verlaufen, sondern nur in streng vorgezeichneten Abständen. Außerdem aber ist, wie der Physiker *Wolfgang Pauli* jun. 1925 gezeigt hat, die Anzahl der Elektronen, die auf ein und derselben „erlaubten“ Bahn laufen, auf höchstens zwei beschränkt. (Aber diese beiden Elektronen müssen sich dadurch voneinander unterscheiden,

daß sie in entgegengesetztem Sinn um die eigene Achse rotieren.) Da jede Bahn nur zwei Elektronen aufnimmt, müssen in dem Maße, wie beim Aufbau einer Atomhülle neue Elektronen sich anlagern, neue Bahnen beansprucht („besetzt“) werden. Die Elektronen „bewerben“ sich am intensivsten um jene Bahnen, die dem Kern am nächsten sind, da die elektrische Anziehungskraft hier stärker wirkt als in größeren Entfernungen vom Atomkern. Je mehr Elektronen aber hinzutreten, um so weiter außen liegende Bahnen müssen von ihnen besetzt werden. Die *Abb. 5* zeigt in stark idealisierter Weise die

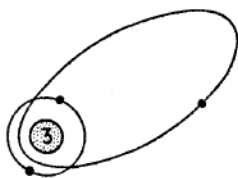


Abb. 5

Atommodell des Elements Lithium

Elektronenbahnen im Normalzustand eines einfach gebauten Atoms, nämlich jenes des Elements Lithium. Die Kernladungszahl und dementsprechend auch die Elektronenzahl dieses Elements betragen je 3. Der Kern ist einfach als Kreis mit hineingeschriebener Ladungszahl dargestellt. Zwei der Elektronen kreisen in der gleichen (der kreisförmigen) Bahn.

Die *Geschwindigkeit* der um den Atomkern kreisenden Elektronen hängt von ihrer Entfernung vom Kern ab. Je näher ein Elektron dem Kern ist, desto größer muß seine Umlaufzahl sein, damit es nicht in den Atomkern stürzt. Ähnlich liegen die Verhältnisse ja auch in unserem Sonnensystem, wo die Umlaufzahl der äußeren Planeten, z. B. des Jupiter, nicht so groß ist wie die der inneren Planeten, z. B. der Erde. Die Geschwindigkeit des einzigen Elektrons im Wasserstoffatom (Kernladungszahl 1) beträgt 2200 Kilometer pro Sekunde. Der *Abstand* dieses Elektrons vom Kern beträgt $\frac{5^3}{1.000.000.000}$ ($=5 \cdot 3 \times 10^{-9}$) cm; es umkreist ihn 6·6 billionenmal in jeder Sekunde!

Die Energiezustände der Atome

Wie erwähnt, hängt die *Bindungsenergie*, die ein Elektron in ein Atom bannt, von seiner Entfernung vom Atommittelpunkt, also vom Kern, ab. Elektronen in der Nähe des Kerns sind stärker wirkender Anziehungskraft ausgesetzt als entferntere Elektronen. Man muß daher, um innere Elektronen aus dem Atom zu entfernen, mehr Energie aufwenden, als für die Austreibung äußerer Elektronen erforderlich ist.

Jede der „erlaubten“ Bahnen in einem bestimmten Atom entspricht also einer ganz bestimmten Energie, die man *aufwenden* muß, um ein auf jener Bahn kreisendes Elektron aus dem Bereich des Atoms zu entfernen; umgekehrt *gewinnt* man — wegen des Gesetzes der Erhaltung der Energie — die gleiche Energie, wenn man ein Elektron von einem Punkt weit außerhalb des Atoms bis in die betreffende Bahn fallen läßt. Die zur Entfernung des Elektrons notwendige Energie kann dem Atom als strahlende Energie, d. h. als Licht, zugeführt werden. Umgekehrt strahlt das Atom selbst, d. h. es emittiert Lichtstrahlungsenergie, wenn es ein von außerhalb stammendes Elektron in eine Bahn einfängt.

Da den Bahnen *verschiedene* Energiewerte entsprechen, wird offenbar auch Energie freigesetzt (oder umgekehrt: aufgebraucht), wenn ein Elektron zwar innerhalb der Atomhülle verbleibt, aber von einer Bahn auf eine andere Bahn überspringt. Da die tiefsten (kernnächsten) Bahnen diejenigen stärkster Bindung sind, wird beim Fall eines Elektrons von einer höheren in eine tiefere Bahn Strahlungsenergie frei; soll das Elektron aber von einer tieferen auf eine höhere (kernfernere) Bahn gehoben werden, so muß die auf dieses Elektron vom Kern ausgeübte Anziehungskraft überwunden werden. Zu diesem Zweck muß Energie eingestrahlt oder sonstwie von außen geliefert werden.

Im Sinne dieser Vorstellungen erklärt sich z. B. das Leuchten einer Glühlampe wie folgt: Der Glühdraht, der aus dem Metall Wolfram besteht, wird elektrisch erhitzt, d. h. es wird den Atomen durch Zusammenstöße mit den Elektronen, die den Strom transportieren, Bewegungsenergie zugeführt. Die bewegten Atome stoßen

mit Nachbaratomen zusammen und heben dabei deren Elektronen in höhere Bahnen. Diese Elektronen fallen dann von selbst in die tieferen Bahnen, in denen sie sich normalerweise befinden, zurück und emittieren die Energiedifferenz als Licht. In einer Quarzlampe wird der Umweg über die Erwärmung vermieden. Die in den Atomen des Quecksilberdampfes, mit dem die Lampe gefüllt ist, kreisenden Elektronen werden direkt durch den Anprall der frei bewegten Elektronen, die den elektrischen Strom transportieren, in höhere Energieniveaus (Bahnen) gehoben. Aus diesen fallen sie dann unter Emission strahlender Energie spontan in die tieferen Bahnen hinab.

Wenn ein Elektron aus einem Atom, z. B. aus dem in elektrisch neutralem Zustand nur *ein* Hüllenelektron besitzenden Wasserstoffatom (Abb. 6, a), gänzlich entfernt worden ist, verbleibt ein

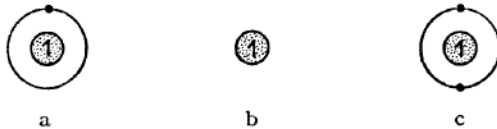


Abb. 6

Wie das Atom zum Ion wird

- a ... elektrisch neutrales Wasserstoffatom
- b ... positives Wasserstoff-Ion
- c ... negatives Wasserstoff-Ion

einfach positiv geladener Atomrest, im Falle des Wasserstoffatoms also der Atomkern (Abb. 6, b). Dieser wird als ein (positives) *Ion* bezeichnet. Das freigemachte Elektron kann sich an ein Atom bestimmter Art anlagern und ihm dadurch eine negative Überschussladung verleihen: Es verwandelt das betreffende Atom, z. B. ein elektrisch neutral gewesenes Wasserstoffatom, in ein (negatives) Ion (Abb. 6, c). *Ionen sind also elektrisch geladene Atome.* Durch Entfernung mehrerer Elektronen aus einem Atom — oder durch Anlagerung mehrerer Elektronen an ein Atom — entstehen mehrfach geladene Ionen.

Das Periodische System der Elemente

Die chemischen Eigenschaften der Atome sind nur durch die Zahl der Elektronen in der Hülle bestimmt. Der Atomkern, der tief im Inneren des Atoms unverändert ruht, bestimmt die chemischen Eigenschaften nur indirekt, nämlich nur auf Grund seiner Ladungszahl. Es hängt ja von dieser ab, wie viele Elektronen sich überhaupt normalerweise in der Hülle befinden. Eine Atomart, die durch eine bestimmte Anzahl von Elektronen in der Hülle (des neutralen Atoms) gekennzeichnet ist, nennt man ein *chemisches Element*. Demgemäß stellen alle Atome, die *ein* Elektron (und Kernladungszahl 1) besitzen, ein und dasselbe Element dar, alle, die *zwei* Elektronen (und Kernladungszahl 2) besitzen, ein anderes Element usw. Die höchste derzeit bekannte Kernladungszahl beträgt 101; daher gibt es 101 verschiedene Elemente. Jedes Element wird kurz durch ein Symbol bezeichnet, z. B. Wasserstoff durch H (Hydrogenium), Sauerstoff durch O (Oxygenium), Kobalt durch Co usw.

Man kann sich also alle Elemente auf diese Weise entstanden denken, daß man dem Atomkern Schritt für Schritt mehr und mehr positive Ladungen hinzufügt. Man versetzt ihn dadurch in die Lage, mehr und mehr Elektronen festzuhalten. Wenn man dieses hier nur gedachte Experiment in Wirklichkeit durchführte, würde man eine sehr merkwürdige Beobachtung machen. Man fände nämlich, daß die dem Atom nacheinander zugeführten Elektronen sich wie die Schichten einer Zwiebel in *Schalen* anordnen. Wir wissen schon (Seite 32), daß die Elektronen nur bestimmte Bahnen durchlaufen können und daß in jeder Bahn nur 2 Elektronen kreisen dürfen. Was jetzt neu ist, ist der Befund, daß jeweils eine Anzahl solcher Bahnen sich zu einer Schale zusammenschließen. Indem die Elektronen allmählich die erlaubten Bahnen auffüllen, füllen sie auch die Schalen auf. Die Anzahl der in den Schalen enthaltenen Bahnen steigt mit zunehmender Kompliziertheit des Atomaufbaus (*Abb. 7*). Zum Beispiel haben in der ersten (tiefsten) Schale 2 Elektronen Platz — sie umfaßt also nur eine Bahn. In der zweiten Schale sitzen bereits 8 Elektronen (in 4 Bahnen), in der dritten, vierten, fünften Schale 8, 18, 32 Elektronen (in 4, 9, 16 Bahnen) usw. Das

Wasserstoff H		Helium He					
① Atomkern mit Kernladungszahl							
• Elektron							
1. Schale		2					
Anzahl der Elektronen							
Lithium Li	Beryllium Be	Bor B	Kohlenstoff C	Stickstoff N	Sauerstoff O	Fluor F	Neon Ne
1. Schale	2	2	2	2	2	2	2
2. Schale	1	2	3	4	5	6	7
Anzahl der Elektronen							
Natrium Na	Magnesium Mg	Aluminium Al	Silicium Si	Phosphor P	Schwefel S	Chlor Cl	Argon Ar
1. Schale	2	2	2	2	2	2	2
2. Schale	8	8	8	8	8	8	8
3. Schale	1	2	3	4	5	6	7
Anzahl der Elektronen							

Abb. 7

Aufbau und stufenweise Auffüllung der Elektronenschalen mit zunehmender Elektronenzahl (schematisch)

Zwecks Vereinfachung der Darstellung ist hier nicht berücksichtigt, daß jede Elektronenschale aus mehreren Elektronenbahnen von verschiedenen Energieniveaus besteht. In Wirklichkeit sind die einzelnen Elektronenbahnen im allgemeinen von elliptischer Gestalt und liegen auch nicht in einer Ebene (wie hier in der Papierebene), sondern sie lagern sich räumlich um den Atomkern.

Element, in dem die erste Schale zuerst aufgefüllt ist, weist also insgesamt 2 Elektronen auf; das Element, in dem die zweite Schale aufgefüllt ist: $2 + 8 = 10$ Elektronen; das Element, in dem die dritte Schale aufgefüllt ist: $2 + 8 + 8 = 18$ Elektronen, usw.

Die Schalenstruktur macht sich durch die chemischen Eigenschaften der Elemente bemerkbar. Es zeigt sich nämlich, daß von einander verschiedene Elemente, die *außerhalb* der *letzten geschlossenen Schale* die gleiche Anzahl von Elektronen besitzen, *ähnliche chemische Eigenschaften* haben. Die Erklärung dieser bemerkenswerten Tatsache liegt offenbar darin, daß die in abgeschlossenen Schalen untergebrachten Elektronen so stabil angeordnet sind, daß sie bei chemischen Umwandlungen nicht mehr leicht zu mobilisieren sind. Diese Umwandlungen betreffen daher in erster Linie die Elektronen *außerhalb* der letzten abgeschlossenen Schale; so ist es verständlich, daß es die Anzahl dieser reaktionsfähigen Außenelektronen (*Valenzelektronen*) ist, die das chemische Verhalten des jeweils betrachteten Elements bestimmt.

Die Elemente, die nur genau abgeschlossene Schalen aufweisen, sind die Elemente der Elektronenzahlen (Kernladungszahlen) 2, 10, 18 usw. Diese Elemente besitzen also gar keine reaktionsfähigen Elektronen. Sie sind deshalb völlig reaktionsträg und unterliegen keinerlei chemischen Reaktionen. Ihre Atome wirken auch auf ihresgleichen nur sehr wenig ein. Wegen der geringen Anziehungskräfte zwischen den Atomen sind diese Elemente meist gasförmig. In Analogie zu der Bezeichnung „Edelmetalle“ nennt man sie *Edelgase*. Die Edelgase mit den Ladungszahlen 2, 10, 18 heißen Helium, Neon, Argon. Alle Edelgase finden sich in der Lufthülle der Erde, Helium und Argon auch als Einschlüsse in bestimmten Mineralen (siehe Seite 68).

Eine andere Gruppe eng verwandter Elemente mit den Elektronenzahlen (Kernladungszahlen, Ordnungszahlen oder Atomnummern) 3, 11, 19 usw. bilden die sogenannten *Alkalimetalle* Lithium, Natrium, Kalium usw. Jedes dieser Elemente hat gegenüber den Edelgasen gerade *ein* Elektron zuviel. Wieder eine andere chemische Verwandtschaftsgruppe sind die *Halogene* Fluor, Chlor, Brom, Jod usw. (Elemente Nr. 9, 17, 35, 53 usw.). Jedem von ihnen fehlt genau *ein* Außenelektron gegenüber einem Edelgas.

Tabelle I
Das Periodische System der Elemente

1H 1·0 Wasserstoff																			2He 4·0 Helium	
3Li 6·9 Lithium		5B 10·8 Bor	6C 12·0 Kohlenstoff															8O 16·0 Sauerstoff	9F 19·0 Fluor	10Ne 20·2 Neon
11Na 23·0 Natrium	12Mg 24·3 Magnesium	13Al 27·0 Aluminium	14Si 28·1 Silicium															15P 31·0 Phosphor	17Cl 35·5 Chlor	18A 39·9 Argon
19K 39·1 Kalium	20Ca 40·1 Calcium	21Sc 45·1 Scandium	22Ti 47·9 Titan	23V 51·0 Vanadium	24Cr 52·0 Chrom	25Mn 54·9 Mangan	26Fe 55·8 Eisen	27Co 58·9 Kobalt	28Ni 58·7 Nickel	29Cu 63·6 Kupfer	30Zn 65·4 Zink	31Ga 69·7 Gallium	32Ge 72·6 Germanium	33As 74·9 Arsen	34Se 79·0 Selen	35Br 79·9 Brom	36Kr 83·7 Krypton			
37Rb 85·5 Rubidium	38Sr 87·6 Strontium	39Y 88·9 Yttrium	40Zr 91·2 Zirkonium	41Nb 92·9 Niobium	42Mo 96·0 Molybdän	43Tc 99·0 Technetium	44Ru 101·7 Ruthenium	45Rh 102·9 Rhodium	46Pd 106·7 Palladium	47Ag 107·9 Silber	48Cd 112·4 Cadmium	49In 114·8 Indium	50Sn 118·7 Zinn	51Sb 121·8 Antimon	52Te 127·5 Tellur	53I 126·9 Jod	54Xe 131·3 Xenon			
55Cs 132·9 Caesium	56Ba 137·4 Barium	57-71 Seltene Erden	72Hf 178·6 Hafnium	73Ta 180·9 Tantal	74W 183·9 Wolfram	75Re 186·3 Rhenium	76Os 190·2 Osmium	77Ir 193·1 Iridium	78Pt 195·2 Platin	79Au 197·2 Gold	80Hg 200·6 Quecksilber	81Tl 204·4 Thallium	82Pb 207·2 Blei	83Bi 209·0 Wismut	84Po 210·0 Polonium	85At 211·0 Astatin	86Em 222·0 Emanation			
87Fr 223·0 Francium	88Ra 226·0 Radium	89Ac 227·0 Actinium	90Th 232·1 Thorium	91Pa 231·0 Protactinium	92U 238·1 Uran															

Anmerkungen: Die Elemente 57-71 (Seltene Erden) müssen in der gewählten Darstellung des Periodischen Systems auf einem Platz untergebracht werden. Über die Einordnung der Elemente 93-101 (Transurane) ist das letzte Wort noch nicht gesprochen. Bei den Elementen 84-92 ist stets das Atomgewicht des langlebigsten Isotops angegeben.

* Radioaktive Elemente, die in der Natur mindestens in Gramm-Quantitäten aufgefunden werden.

** Radioaktive Elemente, die nur in sehr kleinen Mengen natürlich auftreten.

Das chemische Verhalten der Elemente ist also eine periodische Eigenschaft. Ein bestimmter chemischer Charakter kehrt jeweils nach einer gewissen Anzahl von Elementen wieder, nämlich dann, wenn nach Abschluß der nächstfolgenden Edelgasschale wieder die gleiche Anzahl von Außenelektronen erreicht wird. Daß der chemische Charakter bei der Gesamtheit der Elemente eine periodische Eigenschaft ist, wurde in völliger Klarheit zuerst von *Dimitri Mendelejew* (siehe *Bildtafel* bei Seite 65 unten) im Jahre 1869 erkannt. *Mendelejew* ist der Urheber des berühmten *Periodischen Systems der Elemente* (*Tabelle I*, Seite 39). Zwar konnte *Mendelejew* die Elemente nicht nach ihrer Kernladungszahl oder Elektronenzahl ordnen, da diese Begriffe vor der Aufstellung des *Bohr-Rutherford'schen* Atommodells nicht existierten. *Mendelejew* verwendete statt der Kernladungszahl das *Atomgewicht* als ordnendes Prinzip. Etwa zur gleichen Zeit wie *Mendelejew* erkannte auch *Lothar Meyer*, daß gewisse Eigenschaften der Atome sich periodisch mit dem Atomgewicht ändern.

Das Atomgewicht eines Elements gibt an, wievielmals schwerer dessen Atom ist als das leichteste existierende Atom — das Wasserstoffatom. (Diese Definition ist nicht ganz genau, genügt aber für unsere Zwecke.) Zum Beispiel sind die Atomgewichte der genannten drei Alkalimetalle ungefähr 7, 23, 39. Die Elemente wurden also von *Mendelejew* in der Reihenfolge der Gewichte ihrer Atome aneinander gereiht. Dieses Verfahren ergibt im großen und ganzen die gleichen Ergebnisse wie die Ordnung nach steigender Kernladungszahl. Dies erklärt sich daraus, daß man dem Atomkern positive Ladungen nur zuführen kann, indem man ihm schwere Teilchen zuführt. (Das wird auf Seite 47ff. erläutert werden.) Infolgedessen gehen im allgemeinen Ladungszahl (in *Tabelle I* links unterhalb des Symbols in Fettdruck) und Atomgewicht (unter dem Symbol) parallel. Diese Art der Aneinanderreihung führt aber doch *nicht ausnahmslos* zu den richtigen Reihenfolgen, da es neben den elektrisch geladenen Kernbausteinen auch ungeladene gibt, die zur Kernladungszahl nicht beitragen. Auch davon später mehr.

Das Periodische System, wie es hier wiedergegeben ist, enthält so manches Element, das zu *Mendelejews* Zeit noch unbekannt war. All diese seither aufgefundenen Elemente haben sich zwanglos in die

Lücken des Periodischen Systems gefügt, die von *Mendelejew* an gewissen Stellen offengelassen worden waren. Zum Beispiel steht das Element mit dem Atomgewicht 40 (Kalzium) auf Grund seiner starken chemischen Ähnlichkeit mit Magnesium unterhalb dieses Elements in der gleichen Kolonne. Das nächstschwerere damals bekannte Element (Titan mit dem Atomgewicht 48) steht mit ebensolcher Sicherheit unterhalb Silizium. Es steht also nicht unterhalb Aluminium, wohin man es bei lückenloser Aufreihung hätte setzen müssen. Kühn schloß *Mendelejew* aus der Verschiedenheit der Eigenschaften von Titan und Aluminium, daß hier ein Element fehle, d. h. noch nicht aufgefunden worden sei. Er ordnete Titan unterhalb Silizium an und sagte die Eigenschaften des fehlenden Elements mit dem Atomgewicht zwischen 40 und 48 voraus: *Es sollte dem Aluminium ähnlich sein.* Die Voraussage bewahrheitete sich, als das jetzt als Scandium bekannte Element (Atomgewicht 45) bald darauf tatsächlich gefunden wurde.

Als ein Axiom galt während des 19. Jahrhunderts, daß Elemente nicht ineinander umgewandelt werden können. Die Idee einer *Transmutation* der Elemente, das Ziel der Alchimisten, wurde als Aberglaube abgetan. Diese skeptische Einstellung war im 19. Jahrhundert nicht ungesund. Sie trug zur Entwicklung der Chemie bei, indem sie sie von allerlei Irrtümern befreite. Spontane Umwandlungen der Elemente wurden erst bei den radioaktiven Stoffen beobachtet. Die Verfahren der künstlichen Transmutation, die heute geübt und in diesem Buch beschrieben werden, haben mit den unwissenschaftlichen, oft auf Zauberei beruhenden Verfahren der Alchimisten nichts gemein.

Die Bildung chemischer Verbindungen

Seinen hauptsächlichlichen Ausdruck findet der chemische Charakter eines Atoms in seinen *chemischen Reaktionen*, d. h. in der Bildung von chemischen Verbindungen (Molekülen). Durch die Untersuchung der Fähigkeit zur Molekülbildung hatte *Dalton* im Jahre 1805 der

neueren Atomistik endgültig zum Sieg verholfen. *Dalton* zeigte, daß die Atome verschiedener Elemente sich nicht in einem x-beliebigen Verhältnis miteinander verbinden können. Zum Beispiel steht die Menge Sauerstoff, die von einer bestimmten Menge Wasserstoff in Form der Verbindung Wasser gebunden wird, zu der Menge Sauerstoff, die von der gleichen Menge Wasserstoff im Wasserstoffsperoxyd gebunden wird, genau im einfachen ganzzahligen Verhältnis 1 : 2. Sonstige Verbindungen zwischen Wasserstoff und Sauerstoff gibt es nicht. Ganz ähnlich steht die Sache bei Verbindungen anderer Elemente. *Dalton* schloß aus seinem *Gesetz der ganzzahligen Verhältnisse*, daß die Materie aus Atomen bestehen müsse. Nur auf Basis der Atomistik ist verständlich, warum die gebundenen Mengen im Verhältnis ganzzahliger Vielfacher stehen müssen. Ein Atom des Stoffes A kann eben eventuell 1, 2, 3 Atome des Stoffes B binden, aber gewiß nicht etwa z. B. 1·05 Atome, da Atome sich nicht in Zwanzigstel zerteilen lassen!

Heute ist die Chemie längst über die formal-zahlenmäßige Betrachtungsweise *Daltons* hinausgewachsen. Im Vordergrund stehen heute die Fragen des *Bindungstypus*. Es ist recht viel darüber bekannt, *warum* die Atome bestimmte Bindungen eingehen, also sich in bestimmten Verhältnissen zu Molekülen zusammenschließen.

Die wichtigsten Bindungstypen sind die *Elektrovalenz* und die *Kovalenz*. Als Beispiel für die Betätigung der Elektrovalenz sei die Bildung des Kochsalzes (Natriumchlorid) aus den Atomen der Elemente Natrium und Chlor angeführt. Wie auf Seite 38 erwähnt wurde, hat das Natriumatom im Vergleich zu den stabilen Edelgasatomen ein Elektron *zuviel* und das Chloratom hat ein Elektron *zuwenig*. Da ist es naheliegend, daß das Natriumatom dem Chloratom ein Elektron abtritt, so daß zwei Atome (genauer gesagt: elektrisch geladene Atome, also *Ionen*) mit Edelgasschalen entstehen. Die beiden Ionen tragen nun natürlich entgegengesetzte Ladung und ziehen daher einander elektrisch an, wodurch sich der Zusammenhalt (die Bindung) ergibt.

Wenn die Reaktionspartner gegenüber dem im Periodischen System benachbarten Edelgas *zwei* Elektronen zuviel bzw. zuwenig haben (z. B. Magnesium und Sauerstoff), so übersiedeln bei Bildung

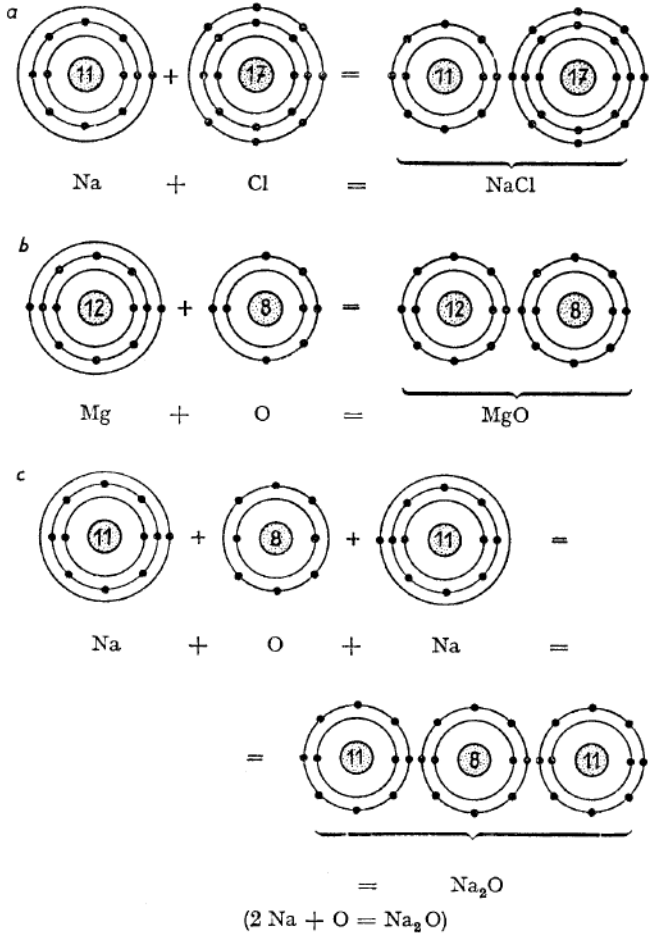


Abb. 8
 Molekülbildung durch Elektrovalenz (schematisch)

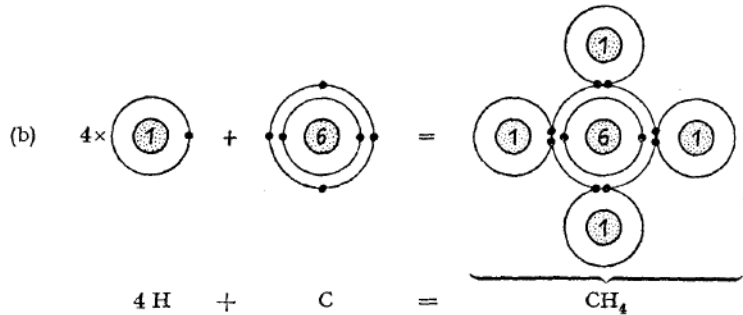
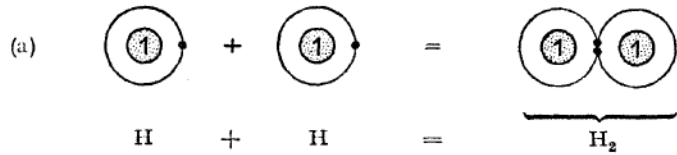


Abb. 9

Molekülbildung durch Kovalenz (schematisch)

der Verbindung *zwei* Elektronen. Solche Elemente werden als *zweiwertig* bezeichnet, während Natrium und Chlor *einwertig* sind. Wenn schließlich z. B. ein einwertiges und ein zweiwertiges Element eine Verbindung eingehen sollen, so müssen zwei Atome des einwertigen mit einem Atom des zweiwertigen Elements zusammentreten, damit der Ausgleich der Elektronen wirklich restlos erfolgen kann. Diese Reaktionen sind in *Abb. 8* idealisiert veranschaulicht, wobei die Atomkerne durch Kreise mit hineingeschriebener Kernladungszahl und die Elektronen durch Punkte dargestellt werden. Durch die Anordnung der Punkte soll rein schematisch ihre Anordnung in Schalen angedeutet werden. Unter den Zeichnungen befinden sich die chemischen Reaktionsgleichungen in der üblichen symbolischen Kurzschrift.

Im Gegensatz dazu tritt bei der Betätigung der *Kovalenz* kein Elektron völlig von einem Atom in ein anderes über. Kovalenz wird

daher besonders von solchen Atomen ausgeübt, bei denen die Tendenz zur Aufnahme oder zur Abgabe eines Elektrons weniger ausgeprägt ist als z. B. bei den Halogenen oder bei den Alkalimetallen. Wir finden Kovalenz also bei Elementen, die den Edelgasen fern stehen. Kovalente Verbindungen kommen dadurch zustande, daß Außenelektronen in den *gemeinsamen Besitz* der sich miteinander verbindenden Atome übergehen. Zu den kovalenten Verbindungen gehören vor allem die Moleküle, die aus mehreren gleichartigen Atomen bestehen, z. B. Wasserstoffmoleküle und Sauerstoffmoleküle; es ist begreiflich, daß die beiden Atome sich hier sozusagen nicht „einigen“ können, wer eigentlich die Außenelektronen verwalten soll. Ganz besonders wichtig sind auch die durchwegs *kovalent* gebauten *organischen Verbindungen*. Als *organisch* bezeichnet man Moleküle, die an Kohlenstoff gebundenen Wasserstoff enthalten. *Abb. 9 (a)* zeigt rein schematisch die Bildung eines Wasserstoffmoleküls aus zwei Wasserstoffatomen und *Abb. 9 (b)* die Bildung von Methan (Sumpf- oder Grubengas) aus einem Kohlenstoffatom und vier Wasserstoffatomen.

Neben den elektrovalenten und den kovalenten Verbindungen sind noch Verbindungen von anderem Typus, z. B. die *metallischen* Verbindungen, bekannt.

Zum Schluß dieses Abschnittes seien als Beispiel großartiger Intuition die Worte *Mendelejew*s zitiert, die er, natürlich lange vor Aufstellung des Atommodells von *Bohr-Rutherford*, schrieb: „Man muß in der Atomistik eine erhabene Verallgemeinerung anerkennen . . . , daß der Aufbau des Universums aus getrennten, räumlich voneinander entfernten, aber durch Wechselwirkung der Kräfte vereinigten Sonnen und Planeten direkt . . . auf die Zusammensetzung der Substanz aus Atomen übertragen worden ist . . . Dem Gewaltigsten Ähnliches im Kleinsten zu finden, bildet einen der Vorzüge der Atomistik.“

Die Atomkerne

Ladungszahl und Massenzahl; Proton und Neutron

Wir haben erwähnt, daß die *Durchmesser der Atome* etwa ein hundertmillionstel ($=10^{-8}$) Zentimeter betragen. Die *Kerne* der Atome sind aber noch ganz wesentlich kleiner; die Durchmesser der Kerne betragen nur ungefähr $\frac{1}{10.000}$ bis $\frac{1}{100.000}$ der Atomdurchmesser. Man nimmt an, daß der Durchmesser des kleinsten Atomkerns, des Kerns des Wasserstoffatoms (Kernladungszahl 1), $\frac{3}{10.000.000.000.000}$ ($=3 \times 10^{-13}$) cm ausmacht; der Durchmesser des größten natürlich vorkommenden Atomkerns, des Kerns des Uranatoms (Kernladungszahl 92), beträgt etwa $\frac{2}{1.000.000.000.000}$ ($=2 \times 10^{-12}$) cm, somit etwa das Siebenfache. Das Atom besteht also, ähnlich wie das Sonnensystem, zum allergrößten Teil aus „leerem“ Raum, nämlich aus Zwischenräumen, die im Verhältnis zu den Ausmaßen von Atomkern und Elektronen ungeheuer groß sind (vgl. Seite 31 und *Abb. 10*).

Trotz der Kleinheit der Atomkerne ist die *Masse des Atoms fast zur Gänze im Kern konzentriert*. Das Atom enthält ja außer dem Kern nur die Elektronen der Hülle, und zwar ebenso viele Elektronen, wie der Kern Ladungen besitzt. Die Elektronen haben aber nur $\frac{1}{1837}$ des Gewichtes des leichtesten Kerns, des Kerns des Wasserstoffatoms. Daher ist die Masse des Wasserstoffatoms, in dem ein Elektron kreist, zu etwa 99·95 % im Mittelpunkt, also im Atomkern, konzentriert. Ähnliches gilt auch für andere Atomarten. Die Dichte der Materie innerhalb des Atomkerns ist also geradezu unvorstellbar groß. Man könnte beispielsweise die jährliche Eisenproduktion der Welt (180 Millionen Tonnen) in den Raum von 2 Kubikzentimetern zusammenquetschen, wenn man die Atomkerne des Eisens *ohne*

Zwischenraum nebeneinanderlegen könnte. Die Verhältnisse werden auch durch *Abb. 11* veranschaulicht. (In gewissen Sternen ist die Materie viel dichter „gepackt“ als auf der Erde. So erreicht die Dichte des *dunklen Siriusbegleiters* den 61.000fachen Wert der Dichte des Wassers. Von einer wirklich lückenlosen Packung ist die Materie aber auch dort noch weit entfernt.)

Die Atomkerne sind aus Bausteinen (*Nukleonen*) zusammengesetzt. Wir kennen zwei Arten von Nukleonen: *Protonen* und *Neutronen*. Die Protonen verleihen dem Kern seine *positive* Ladung; jede dieser Ladungen ist der (negativen) Ladung des Elektrons *genau gleich*. Daß es außerdem noch elektrisch ungeladene, also neutrale Nukleonen geben muß, ersieht man aus der Existenz von Kernen, die zwar gleiche *Ladung* tragen, sich aber doch durch ihre *Masse* voneinander unterscheiden. Dies ist offenbar nur möglich, wenn der schwerere von zwei gleich geladenen Kernen außer den Protonen, die er in gleicher Zahl wie der leichtere Kern besitzt, noch Bausteine anderer Art enthält, die zwar zur Masse, aber nicht zur Ladung des Kerns beitragen. Jene Kernbausteine können also nur elektrisch neutrale Teilchen sein, weshalb sie als *Neutronen* bezeichnet werden. Ihre Masse ist, wie das Experiment zeigt, mit der der Protonen nahezu identisch. Daher nennt man einfach die Anzahl der Nukleonen (Protonen + Neutronen) die *Massenzahl* des Kerns.

Die Existenz des Neutrons war schon 1920 von *Rutherford* auf Grund theoretischer Überlegungen vorausgesagt worden. Sogar die physikalischen Eigenschaften des Neutrons wurden damals richtig prophezeit. Es wurde aber erst im Jahre 1932 von *James Chadwick* aufgefunden, als er gewissen merkwürdigen Beobachtungen *Bothes* und *Joliot's* nachging. *Chadwick* war ein Schüler *Rutherford's* und hatte auf das Neutron gewissermaßen nur „gewartet“. Die Theorie des Atomkerns wurde dann von *Heisenberg* und *Iwanenko*, die voneinander unabhängig arbeiteten, begründet.

In *Abb. 12* sind einige einfache *Atomkerne* dargestellt, wie sie sich aus Protonen und Neutronen aufbauen lassen. Die schwarzen Kreise sollen die Protonen, die weißen Kreise die Neutronen darstellen.

Die Kernladungszahl ist also durch die Anzahl der Protonen bestimmt. Sie beträgt gemäß *Abb. 7* für leichten und für schweren

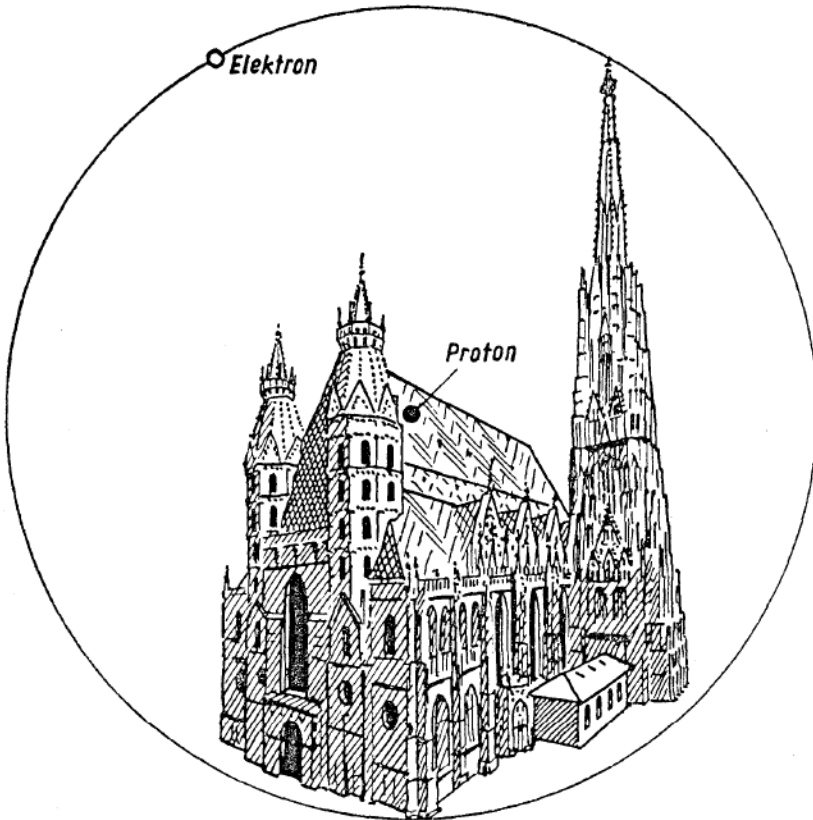


Abb. 10

Das kleinste aller Atome, das Wasserstoffatom, einbillionmal (d. h. eine Million millionenmal) vergrößert

Im Inneren des so ungeheuer vergrößert gedachten Atoms hätte der Wiener Stephansdom mit fast dem ganzen Turm Platz. Atomkern (Proton) und Hüllenelektron hätten nicht einmal ganz die Größe je einer Erbse. Alles übrige ist leerer Raum.

Im wirklichen Atom kreist das Elektron mit einer Geschwindigkeit von 2200 Kilometer fast 7 billionenmal (d. h. 7000 Millionen millionenmal) in der Sekunde um den Atomkern.

Wasserstoff je 1, für leichtes und für schweres Helium aber je 2. Die Ladungszahl gibt uns nach Seite 32 auch die Anzahl der Elektronen an, die ein solcher Atomkern als „Planeten“ um sich kreisen lassen kann — immer vorausgesetzt, daß das sich ergebende vollständige Atom als Ganzes elektrisch ungeladen, also neutral sein soll.

Man darf allerdings nicht versuchen, die Protonen und die Neutronen zeichnerisch in irgendeiner besonderen, malerischen Weise zu gruppieren — wozu vor allem Kerne, die aus vielen Bausteinen bestehen (z. B. Uran), verlocken. Zumindest darf man nicht erwarten, daß sich die Natur an unsere Phantasien hält. Vielmehr sind die Teilchen innerhalb der Kerne stets in lebhaftester ungeordneter Bewegung begriffen, so daß die Struktur ein und desselben Kerns wechselt. *Niels Bohr* hat von einem „Tröpfchenmodell“ des Atomkerns gesprochen. So wie sich in einem Tröpfchen einer Flüssigkeit, z. B. Wasser, keine dauernde Anordnung der Moleküle ausbilden kann (vgl. Seite 24), sondern die Moleküle durch die Stöße ihrer Nachbarn immer wieder aus der Ruhe gebracht werden, ändert sich auch die Struktur des Atomkerns ständig. Allerdings sind die Teilchen im Atomkern keine Moleküle, sondern eben Neutronen und Protonen. Es handelt sich also bei diesem Vergleich nur um ein Bild, um eine Analogie.

Es wäre freilich recht umständlich, wenn man in der wissenschaftlichen und in der technischen Literatur stets Zeichnungen ähnlich *Abb. 12* anlegen müßte, um die Zusammensetzung von Atomkernen anzugeben. Man begnügt sich daher praktisch, ähnlich wie in der Chemie, mit einer einfachen *Symbol- oder Formelsprache*. Zum Beispiel werden die in der *Abb. 12* dargestellten Kerne einfach durch die Zeichen ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^4_2\text{He}$ bezeichnet. Neben dem chemischen Symbol steht links unten die Kernladungszahl, also die Protonenanzahl, links oben die Massenzahl des Kerns, d. h. die Summe von Protonen- und Neutronenanzahl, also die Anzahl der Nukleonen. Eigentlich ist der Atomkern durch diese beiden Größen bereits eindeutig beschrieben. Andere Kernbausteine als Protonen und Neutronen gibt es ja nicht. Insbesondere sind die chemischen Eigenschaften des Atoms durch die Protonenanzahl allein bestimmt. Ein Kern mit *einem* Proton



Abb. 11

Der Mount Everest im Handkoffer (Verkleinerung des Bergriesen 1: 100.000)

Könnte man die Atome, aus denen das Gebirgsmassiv sich aufbaut, von ihren Elektronenhüllen befreien und die die Masse bestimmenden Kerne lückenlos dicht nebeneinanderlagern, so fände die gesamte Masse des fast 9000 Meter hohen Bergriesen unter Beibehaltung seines ungeheuren Gewichtes in einem Handkofferchen Platz.

kann keine anderen Eigenschaften als die des *Wasserstoffs*, ein Kern mit *zwei* Protonen keine anderen Eigenschaften als die des *Heliums* haben. Immerhin schreibt man noch zur Verdeutlichung das chemische Symbol des Atoms hin, das den betreffenden Kern enthält: in unserem Falle H und He.





	a	b	c	d
				
Massenzahl:	1	2	3	4
Kernladungszahl:	1	1	2	2

Abb. 12

Aufbau von Atomkernen aus Protonen und Neutronen

● ... Proton

○ ... Neutron

a ... einfaches Proton – Kern des gewöhnlichen Wasserstoffs ($\begin{smallmatrix} 1 \\ 1 \end{smallmatrix} \text{H}$);

b ... 1 Proton + 1 Neutron – Kern des schweren Wasserstoffs ($\begin{smallmatrix} 2 \\ 1 \end{smallmatrix} \text{H}$);

c ... 2 Protonen + 1 Neutron – Kern des leichten Heliums ($\begin{smallmatrix} 3 \\ 2 \end{smallmatrix} \text{He}$);

d ... 2 Protonen + 2 Neutronen – Kern des gewöhnlichen Heliums ($\begin{smallmatrix} 4 \\ 2 \end{smallmatrix} \text{He}$).

Isotope

Allerdings kann man feststellen, daß verschieden aufgebaute Atomkerne doch gleiche Elektronenhüllen mit gleicher Elektronenanzahl besitzen können — eben wenn die Kernladungszahl gleich, aber die Neutronenanzahl und damit auch die Massenzahl verschieden sind. Leichter und schwerer Wasserstoff ebenso wie leichtes und schweres Helium sind Beispiele solcher Kernverhältnisse. Atome, die in dieser Weise zwar verschiedene Neutronen- und Massenzahl, aber gleiche Protonenzahl (Kernladungszahl) haben, werden nach *Soddy Isotope* genannt. Aus Seite 36 wissen wir, daß die chemischen Eigenschaften der Atome durch die Kernladungszahl (=Elektronenzahl) bestimmt sind; daher dürfen wir erwarten, daß *Isotope ein und desselben Elements gleiche chemische Eigenschaften besitzen*.

Wegen der chemischen Identität von Isotopenpaaren sollte es auch gar nicht möglich sein, sie durch irgendeinen chemischen Prozeß voneinander zu trennen. Diese chemische Identität läßt sich experimentell zwar nicht mit aller Strenge, aber doch in ausgezeichneter Annäherung bestätigen. Man muß im allgemeinen sehr genaue Experimente anstellen, um irgendeinen Unterschied im chemischen Ver-

halten von Isotopen nachzuweisen. Übrigens lassen sich diese geringfügigen Unterschiede auch theoretisch begründen und voraussehen. Verhältnismäßig am größten sind die Unterschiede noch zwischen leichtem und schwerem Wasserstoff, weil in diesem extrem gelagerten Spezialfall die Massenzahl des schwereren Isotops (*Deuterium* genannt) immerhin doppelt so groß ist wie die Massenzahl des leichteren Isotops (siehe *Abb. 12*).

Die *Massenzahl*, also die Anzahl der Nukleonen pro Atom, muß natürlich für jedes Element, das nur aus Kernen einer einzigen Art (also nicht aus einer Mischung von Isotopen) besteht, eine *ganze Zahl* sein. Solche Elemente werden als *Reinelemente* bezeichnet. Zum Beispiel bestehen in der Natur das Natrium (${}_{11}^{23}\text{Na}$), der Phosphor (${}_{15}^{31}\text{P}$), das Mangan (${}_{25}^{55}\text{Mn}$) und das Jod (${}_{53}^{127}\text{J}$) nur aus je einem Isotop. Die Anzahl der Neutronen ist damit in allen Kernen jedes dieser Elemente genau festgelegt (12, 16, 30, 74) und ist jeweils gleich der Differenz zwischen Massenzahl und Ladungszahl.

Wir halten also fest: (I) *Massenzahl* = Zahl der Nukleonen; weiters: (II) *Atomgewicht* = (annähernd) Gewicht, bezogen auf Gewicht des (leichten) Wasserstoffatoms (vgl. Seite 40); schließlich wissen wir jetzt (III), daß das leichte Wasserstoffatom (der schwere Wasserstoff kann wegen seiner Seltenheit immer unberücksichtigt bleiben) aus einem Nukleon und einem praktisch gewichtlosen Elektron besteht. Aus I, II und III ergibt sich sofort, daß das *Atomgewicht eines Reinelements (bezogen auf das Atomgewicht des Wasserstoffs) praktisch gleich seiner Massenzahl ist*. Wenn auch wegen der Nichtganzzahligkeit der Gewichte kleine Abweichungen vorkommen müssen, so ist doch in jedem Fall die Massenzahl stets diejenige ganze Zahl, die dem Gewicht am nächsten liegt. Ein Blick auf das Periodische System (Seite 39) bestätigt diesen Sachverhalt. Zum Beispiel sind für die genannten vier Reinelemente die Gewichte 23·0, 31·0, 54·9 und 126·9, während die Massenzahlen einfach 23, 31, 55 und 127 betragen. Warum die Atomgewichte von Reinelementen zwar angenähert, aber doch nicht vollkommen ganzzahlig sind, wird uns auf den Seiten 106—107 kurz beschäftigen.

Neben den Reinelementen kommen in der Natur auch viele Elemente vor, die aus einer *Mischung von Isotopen* bestehen. Den Rekord hält das Element Zinn mit 10 natürlich vorkommenden Isotopen. Da Isotope durch chemische Vorgänge nicht getrennt werden, sind die Isotope eines jeden Elementes auch während der Erdgeschichte stets im gleichen Verhältnis durchmischt geblieben, so daß im allgemeinen die Durchschnittsatomgewichte unabhängig von der Herkunft einer Probe stets gleich sind. Diese Durchschnittsatomgewichte sind durch das Mischungsverhältnis bestimmt. Während die Atomgewichte der einzelnen Isotope für sich natürlich immer (nahezu) ganzzahlig bleiben, können die Atomgewichte der *Mischelemente* jeden beliebigen Wert annehmen. Bei Wasserstoff und Helium ist die Abweichung des Durchschnittsatomgewichts von der Ganzzahligkeit wegen des starken Überwiegens des einen Isotops zwar noch gering. Aber z. B. beim Chlor, wo die Isotope der Massenzahlen 35 und 37 in der Natur im Häufigkeitsverhältnis von etwa 3 : 1 stehen, beträgt das Durchschnittsatomgewicht 35,5, ist also so unganzzahlig wie nur möglich!

Stabile und instabile Atomkerne

Heute kennt man Atomkerne mit Protonenzahlen zwischen 1 und 101; mit ihren Elektronenhüllen entsprechen diese Kerne den Atomen der bekannten Elemente (siehe Periodisches System, Seite 39). Eigentlich müßte man in die Reihe der Elemente freilich auch das Element aufnehmen, dessen Kernladung null ist, dessen Atomkern also überhaupt kein Proton, sondern nur ein Neutron enthält — nämlich allein aus diesem Neutron besteht. Den Kern dieses Elementes müßte man durch die Kennzahlen 1_0 bezeichnen. Dieses Atom enthält überhaupt kein Elektron, wie ja durch die Kernladungszahl 0 ausgedrückt ist.

Einige Elemente sind nur künstlich erzeugt worden, aber die große Mehrheit wurde in der Natur aufgefunden. Die *Häufigkeit* der Elemente — d. h. der Kerne bestimmter Ladungszahl — ist sehr ver-

schieden. Beispielsweise ist das Eisen ungleich häufiger als seine beiden Nachbarn im Periodischen System, Mangan und Kobalt. Man darf wohl annehmen, daß sich im Grade der Häufigkeit eine unterschiedliche Stabilität (Beständigkeit) der Atomkerne kundgibt. Besonders stabile Atomkerne müssen sich zur Zeit der Entstehung der Elemente aus Protonen und Neutronen vor Milliarden Jahren leichter gebildet haben als instabile. (Allerdings darf man das Häufigkeitsverhältnis in der Erdkruste keineswegs dem allgemeinen Häufigkeitsverhältnis der Elemente in der Erde gleichsetzen, weil die verschiedenen Elemente sehr verschiedene Neigung aufweisen, sich in den Gesteinen der Erdkruste — im Gegensatz zum Erdinneren — anzureichern; auch unterscheidet sich die relative Häufigkeit der einzelnen Elemente auf verschiedenen Gestirnen, beispielsweise jene auf der Erde von jener auf der Sonne.)

Tatsächlich hat sich die verschiedene Stabilität der Atomkerne nicht nur in grauer Vorzeit ausgewirkt. Vielmehr können wir beobachten, wie sich Atomkerne vor unseren Augen von selbst (spontan) in andere Atomkerne umwandeln. Offenbar geht bei solchen Umwandlungen die Materie aus einem weniger stabilen in einen stabileren Zustand über. Man bezeichnet diese selbsttätigen Umwandlungsvorgänge als *spontane Atomkernreaktionen* oder einfach als *spontane Kernreaktionen*. Sie zeigen insofern eine Analogie mit den gewöhnlichen *chemischen Reaktionen*, als bei den letzteren die Elektronenhüllen aus einem weniger stabilen in einen stabileren Zustand übergehen (*Abb. 8*, Seite 43, und *Abb. 9*, Seite 44).

Ein einfaches Beispiel einer spontanen Kernreaktion ist in *Abb. 13*

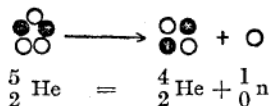


Abb. 13

Beispiel einer spontanen Kernreaktion

● ... Neutron
○ ... Proton

dargestellt. Das Heliumisotop mit der Masse 5 (das übrigens wegen seiner Unbeständigkeit in der Natur nicht vorkommt, aber künstlich erzeugt werden kann) sendet spontan ein Neutron aus, so daß ein Heliumkern mit der Masse 4 verbleibt. Bei Reaktionen dieser Art brauchen wir die Elektronen der Atomhüllen gar nicht anzuschreiben, denn sie nehmen an der Kernreaktion nicht teil und beeinflussen sie in keiner Weise.

Man erkennt, daß sich bei den Kernreaktionen weder die Summe der oberen Kennziffern oder Indexzahlen ($5 = 4 + 1$) noch die Summe der unteren Indexzahlen ($2 = 2 + 0$) ändern darf. Das heißt, es darf sich weder die *gesamte Massenzahl* noch die *gesamte Ladung* aller Reaktionsteilnehmer ändern. Es ist nämlich, wie bekannt, ein fundamentales Naturgesetz, daß sowohl die Masse als auch die elektrische Ladung der Materie erhalten bleiben müssen, daß also weder Masse noch elektrische Ladung verschwinden oder neu entstehen können.

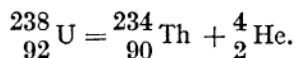
Diese spontanen Kernreaktionen sind als *radioaktive Reaktionen* bekannt. Die *Radioaktivität* wurde im Jahre 1896 von *Becquerel* in Paris entdeckt, als er photographische Platten in die Nähe von *Uranverbindungen* brachte. Wenn so eine Platte nach einiger Zeit entwickelt wurde, erwies sie sich als geschwärzt. Diese Beobachtungen wurden von *Pierre Curie* und *Marie Sklodowska-Curie* geklärt. Das Ehepaar *Curie* fand, daß das Uran spontan Strahlen abgibt, die photographisch wirksam sind — und zwar unabhängig von seiner chemischen Verbindungsform und von sonstigen experimentellen Umständen, z. B. Druck und Temperatur.

Die *Curies* fanden, daß jedes Uranmineral auch radioaktive Stoffe enthält, die chemisch vom Uran verschieden sind. Sie machen zwar nur einen kleinen Teil vom Gewicht des Uranminerals aus, sind aber je Gewichtseinheit viel stärker wirksam. In mühevoller Arbeit unter ungünstigen materiellen Verhältnissen gelang es den *Curies*, diese Stoffe aus großen Mengen Uranerz chemisch abzutrennen. Zu ihnen gehören vor allem das von *Marie Curie-Sklodowska* zu Ehren ihrer durch den Zarismus unterdrückten Heimat Polen benannte *Polonium* und das *Radium*, dessen Name vom lateinischen „radius“ (=Strahl) abgeleitet ist. Das Uranerz, das den *Curies* als Aus-

gangsmaterial diente, war ihnen durch einen wissenschaftsfreundlichen Beamten des österreichischen Ministeriums verschafft worden, das die Urangruben von Joachimsthal (Jachymov) in dem damals zu Österreich gehörenden Böhmen betrieb.

Radioaktive Zerfallsreihen

Es erforderte viele Jahre, bis die Wissenschaft ein einheitliches Bild der im Uran sich abspielenden Vorgänge entwickelte. Heute aber wissen wir, daß es sich um eine *Kette spontaner Kernreaktionen* handelt, die in *Tabelle II*, Seite 61, dargestellt ist. Der Atomkern des Urans (Formel des häufigsten Isotops: ${}_{92}^{238}\text{U}$) ist instabil. Er unterliegt früher oder später einem *Zerfall* gemäß der Reaktionsgleichung:



Th ist das Symbol des Elements mit Ladungszahl 90 (Thorium); aber das beim Uranzerfall entstehende Element 90 ist nicht das gewöhnliche Thorium, sondern ein Thoriumisotop von anderer Massenzahl; in der Zerfallsreihe des Uran 238 (*Tabelle II*) wird es gewöhnlich als *Uran X₁* bezeichnet. Bei diesem Zerfall entsteht also ein Heliumkern. Er wird mit großer Wucht aus dem Uran ausgestoßen und ist, solange er sich schnell bewegt, auch als *Alphateilchen* bekannt. Seine Bahn bildet einen *Alphastrahl*. Der beschriebene Kernprozeß heißt *Alphazerfall*. (Über den Nachweis dieser und anderer Strahlung siehe Seite 62 ff.)

Der neu entstandene Kern ${}_{90}^{234}\text{Th}$ ist auch nicht stabil. Er unterliegt selbst wieder spontanem Zerfall. Doch ist die Zerfallsreaktion dieses Kerns von anderer Art als der vorangegangene Uranzerfall. Sie besteht nämlich nicht im Ausstoß eines Heliumkerns, sondern darin, daß sich ein Neutron im Kern spontan in ein Proton umwandelt. Dabei wird also eine positive elektrische Ladung im Kern neu geschaffen.

Nach dem schon genannten Gesetz von der Erhaltung der elektrischen Ladung muß das Entstehen der *positiven* Ladung durch das gleichzeitige Entstehen einer *negativen* Ladung wettgemacht werden. Andererseits darf die bei dieser Kernreaktion entstehende negative Ladung keine Massenzahl tragen, damit das Gesetz der Erhaltung der Massenzahl nicht verletzt werde; denn Proton und Neutron haben ja die gleiche Massenzahl (eins), so daß sich bei ihrer Umwandlung ineinander die Massenzahl des Kerns nicht ändert.

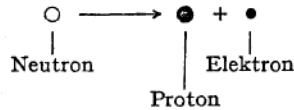
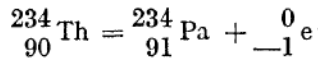


Abb. 14
Betazerfall

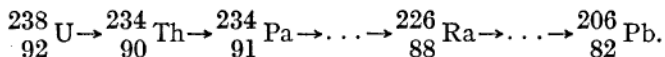
Ein Teilchen, das den gestellten Bedingungen genügt, das also zwar eine negative Ladung, aber nur äußerst geringe Masse besitzt, ist das *Elektron*. Die in einem Atomkern vor sich gehende Umwandlung eines Neutrons in ein Proton ist nun in der Tat mit der Aussendung eines Elektrons verbunden, wie es in *Abb. 14* angedeutet ist. Dieses bewegte Elektron ist als *Betateilchen* bekannt; die Erscheinung heißt *Betazerfall*. Beim Betazerfall ändert sich die Massenzahl (oberer Index) nicht, da diese beim Betateilchen (Elektron) gleich null ist: es enthält kein Nukleon. Wohl aber nimmt die Ladungszahl (unterer Index) um eine Einheit zu, da die Ladungszahl des Betateilchens minus eins ist.

Die Formel für den Betazerfall des ${}_{90}^{234}\text{Th}$ lautet also:



Pa ist das chemische Symbol des Elements 91, des Protaktiniums. Das Protaktiniumisotop 234 wird *Uran X₂* genannt. Das Produkt

dieses Zerfalls, der Kern ${}_{91}^{234}\text{Pa}$, unterliegt wieder einem Betazerfall, sein Produkt ${}_{92}^{234}\text{U}$ wieder einem Alphazerfall usw. Eines der Glieder dieser Zerfallskette ist das *Radium* (Ra). Die Zerfallskette findet erst dann ihr Ende, wenn sie zu einem stabilen Zerfallsprodukt führt. Das stabile Endprodukt der *radioaktiven Reihe*, die durch den Zerfall des Kerns ${}_{92}^{238}\text{U}$ eingeleitet wird, ist ein Kern des *Bleis*isotops ${}_{82}^{206}\text{Pb}$:



Die beim Zerfall der Glieder einer radioaktiven Reihe emittierten Alphateilchen (bewegten Heliumkerne) und Betateilchen (bewegten Elektronen) verlieren durch Zusammenstöße mit Atomen der Umgebung rasch ihre hohe Anfangsenergie. Damit entziehen sie sich aber auch der weiteren individuellen Nachweisbarkeit, denn diese beruht ja eben nur auf der Energie dieser Teilchen. Sie „leben“ dann als Kern eines gewöhnlichen Heliumatoms bzw. als gewöhnliches Elektron fort.

Beim Alpha- und beim Betazerfall erscheint die entbundene Energie zunächst hauptsächlich als Bewegungsenergie körperlicher Teilchen (Alpha- und Betateilchen). Sie setzt sich beim Anprall dieser Teilchen an Materie in Wärme um. Daneben wird aber oft auch Energie, die gleichfalls aus Kernreaktionen stammt, durch die Kerne direkt als eine Art sehr energiereicher „Licht“-Strahlung (*Gammastrahlung*) emittiert. Diese Strahlung ist der Röntgenstrahlung verwandt, ist aber normalerweise noch energiereicher und daher auch durchdringender (härter) als diese. Die Energie der Gammastrahlung setzt sich beim Durchgang durch Materie allmählich ebenfalls in Wärme um. In der Regel muß man Bleischirme von einigen Zentimetern Dicke oder entsprechend dickere Schirme aus anderem Material verwenden, wenn ein wesentlicher Teil dieser Strahlung absorbiert werden soll. Die elektrisch geladene Alpha- und Betastrahlung wird, wie *Stefan Meyer* und *Schweidler* fanden, im Magnetfeld abgelenkt; die Gammastrahlung hingegen erfährt keine Ablenkung.

Halbwertszeiten

Allerdings ist der Instabilitätsgrad der einzelnen Kerne ganz verschieden. Zum Beispiel beträgt die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein bestimmter, beliebig herausgegriffener Urankern im nächsten Jahr zerfällt, 0·000000015 %, während die für den erwähnten Zeitraum bestehende Zerfallswahrscheinlichkeit für einen Radiumkern mit 0·044 % und für einen Poloniumkern sogar mit 84 % anzusetzen ist. Demgemäß wird von einer vorgegebenen Uranmenge erst nach 4·5 Milliarden Jahren die Hälfte zerfallen sein, von einer Radiummenge nach 1590 Jahren und von einer Poloniummenge schon nach 140 Tagen. Diesen für verschiedene radioaktive Elemente verschiedenen großen Zeitraum bezeichnet man als die *Halbwertszeit* des betreffenden Radioelements. Die Halbwertszeit ist für jedes Radioelement charakteristisch und wird durch äußere Umstände in keiner Weise beeinflußt. Sie behält für ein und dieselbe Atomart den gleichen Wert, ob die Substanz nun im Eiskasten oder in einem Glühofen, im luftleeren Raum oder unter einer hydraulischen Presse, in Form des Elements oder als chemische Verbindung aufbewahrt wird. Übrigens zerfällt — strenggenommen — keine radioaktive Substanz jemals vollständig. Nach einer Halbwertszeit ist die Hälfte zerfallen, nach einer weiteren Halbwertszeit die Hälfte der übriggebliebenen Hälfte, also insgesamt drei Viertel, nach einer dritten Halbwertszeit insgesamt sieben Achtel, dann fünfzehn Sechzehntel usw.

Die internationale Einheit der Radioaktivität ist das *Curie*. Nach der Definition hat ein Gramm Radium die Aktivität von *1 Curie*. Andere Radioelemente zeigen die Aktivität von 1 Curie, wenn sie in der Sekunde ebenso vielen Kernzerfällen unterliegen wie ein Gramm Radium (37 Milliarden). Ein Milligramm Radium hat die Aktivität *1 Millicurie*, ein Millionstelgramm (Mikrogramm) *1 Mikrocurie*, ein Kilogramm *1 Kilocurie*. Neuerdings werden so große Mengen an Radioelementen hergestellt, daß sogar die Einheiten *Megacurie* (entsprechend 1 Tonne Radium) und *Gigacurie* (entsprechend 1000 Tonnen Radium) verwendet werden.

Auch einige natürliche Elemente, die nicht den radioaktiven Reihen angehören, haben sich als radioaktiv erwiesen, z. B. *Rubidium*,

Samarium und besonders *Kalium*. Im Kalium ist nur das zu 0·012 % anwesende Isotop mit der Massenzahl 40 aktiv; seine Halbwertszeit beträgt 1·3 Milliarden Jahre.

Tabelle II
Zerfallsreihe des Uran 238
 (etwas vereinfacht)

Element	Atomgewicht	Kernladungszahl	Strahlung	Halbwertszeit
Uran I.	238	92	Alpha	4·56 Milliarden Jahre
Uran X 1	234	90	Beta	24·5 Tage
Uran X 2	234	91	Beta	1·14 Minuten
Uran II	234	92	Alpha	270.000 Jahre
Ionium	230	90	Alpha	76.000 Jahre
Radium.....	226	88	Alpha	1.590 Jahre
Radiumemanation (Radon)	222	86	Alpha	3·825 Tage
Radium A.....	218	84	Alpha	3·05 Minuten
Radium B	214	82	Beta	26·8 Minuten
Radium C	214	83	{Beta }* {Alpha }	19·7 Minuten
Radium C'	214	84	Alpha	0·000.148 Sekunden
Radium C''.....	210	81	Beta	1·32 Minuten
Radium D	210	82	Beta	22 Jahre
Radium E	210	83	Beta	5 Tage
Radium F (Polonium)	210	84	Alpha	140 Tage
Blei (Radiumblei, Uranblei).....	206	82	—	stabil

* Verzweigung; es bildet sich nämlich bei Betazerfall Radium C', bei Alphazerfall Radium C'', und zwar mit der Häufigkeit von 99·96 bzw. 0·04%.

Durch die Halbwertszeit ist bloß die *mittlere* Zerfallsgeschwindigkeit bestimmt. Die Lebensdauer des *einzelnen* radioaktiven Atoms läßt sich aber nicht vorhersagen. Daher ist auch die Aktivität von Präparaten zeitlichen *Schwankungen* unterworfen, die desto größer sind, aus je weniger Atomen sie bestehen (*Schweidler*).

Methoden des Nachweises radioaktiver Strahlen

Die Methoden, radioaktive Strahlen nachzuweisen, beruhen ausnahmslos auf deren *enormer Energie*. An einem einzelnen Zerfallsvorgang ist doch nur ein einziges Atom beteiligt und es wird nur ein einziges Teilchen ausgeschleudert. In der *Chemie* wäre natürlich der Nachweis eines einzelnen Teilchens, z. B. eines einzelnen Sauerstoffatoms, ganz unmöglich. Der letzte Grund dafür liegt darin, daß alle Meßgeräte, was auch die Einzelheiten ihrer Konstruktion sein mögen, ihrerseits aus einer unvorstellbar großen Zahl von Atomen bestehen müssen, so daß das Hinzutreten eines zusätzlichen Atoms keine nennenswerte Wirkung haben kann. Anders liegen die Verhältnisse bei den Vorgängen der *Radioaktivität*. Hier reicht nämlich die von dem ausgestrahlten Teilchen mitgebrachte Energie hin, um eine sehr große Anzahl von Atomen, die sich von vornherein im Meßgerät befinden, aus ihrer relativen Ruhe aufzuscheuchen. Zum Beispiel beraubt ein Alphateilchen von Polonium, wenn es gleich einer Kanonenkugel durch Luftatome saust, im Mittel etwa 150000 Atome je eines Elektrons. Die Elektronen werden aus den Atomen herausgeboxt, d. h. die Atome werden in *Ionen* verwandelt. Einen „Stoß“ von 150000 Ionen nachzuweisen, ist aber infolge der von ihnen getragenen elektrischen Ladung schon durchaus möglich.

Die altehrwürdige Nachweismethode besteht in der *Photographie*. Schon *Becquerel* hatte gezeigt, daß die Strahlen, wenn sie auf eine photographische Emulsion auftreffen, auf sie schwärzend wirken. Diese Methode ist seither ausgebaut worden, und es ist jetzt ohne weiteres möglich, mit geeigneten Spezialplatten die Spuren zu registrieren, die ein *einzelner* Alphastrahl (*Bildtafel* bei Seite 80 oben) oder ein Betastrahl (*Bildtafel* bei Seite 80 unten) erzeugt. Aus der Zahl, Länge und Form der Spuren kann man schließen, wieviel radioaktiver Stoff anwesend ist, wie groß die Energie der Strahlung ist und ob es sich um Alpha-, Beta- oder sonstige Strahlen handelt.

Eine besondere Anwendungsform der photographischen Methode ist die sogenannte *Autoradiographie*. Ein Präparat mit ebener Oberfläche, z. B. der Schliff eines Minerals oder eines Metalls oder ein

Schnitt aus einem lebenden Gewebe, wird gegen eine Photoplatte gepreßt. Die Platte wird an jenen Stellen geschwärzt (ohne daß man in der Regel einzelne Spurbahnen unterscheidet), wo radioaktives Material mit ihr in Berührung ist. Man erhält so ein unmittelbares *anschauliches Bild* der *Verteilung* des Radioelements in dem Präparat (siehe *Bildtafel* bei Seite 128). Beispielsweise erkennt man sogleich, *in welchen Bestandteilen* eines aus einer Mischung verschiedener Minerale bestehenden Gesteins (z. B. Granit) die radioaktiven Stoffe angereichert sind.

Nebelkammer

Die *Nebelkammermethode* ist der Photomethode insofern nicht unähnlich, als auch sie ein unmittelbar anschauliches Bild des Einzelvorganges liefert. Sie wurde zu Anfang unseres Jahrhunderts von *Wilson* eingeführt und wird bis zum heutigen Tag verwendet. Ihre Grundlage besteht darin, daß Ionen *übersättigte Dämpfe zur Kondensation veranlassen*. Bei jeder Temperatur kann z. B. Wasserdampf nur in einer gewissen Höchstkonzentration in Luft vorhanden sein. Wird diese Konzentration überschritten, so verflüssigt sich das überschüssige Wasser, d. h. es tritt Kondensation zu kleinen Tröpfchen ein. Da die Tröpfchen zunächst sehr klein sind, bleiben sie als feiner Nebel schweben. *Wilson* fand nun, daß diese Kondensation zu Tröpfchen normalerweise nicht augenblicklich bei Überschreitung der Sättigungskonzentration erfolgt. Vielmehr braucht der übersättigte Dampf bei der Kondensation „Hilfe“. Diese wird ihm durch sogenannte Kondensationskeime geboten, auf denen sich die Tröpfchen absetzen können und die z. B. durch Staubteilchen gebildet werden. Deshalb muß Staub aus Nebelkammern sorgfältig ferngehalten werden. Die Kondensation erfolgt aber auch durch Ionen. Daher bilden sich in einer Nebelkammer, in der ein Dampf in den übersättigten Zustand überführt wird, entlang der Bahn radioaktiver Strahlen Tröpfchen, die die Form und Länge der Bahnspur genau erkennen lassen und automatisch photographiert werden können (*Bildtafel* bei Seite 81 unten). Wenn sie von mehreren Seiten gleichzeitig photographiert werden, erhält man schöne stereoskopische Bilder.

Ionenkammer

Eine dritte Nachweismethode gründet sich auf die *Ionenkammer*. Die Strahlen verlaufen in einem gasgefüllten Gefäß, in dem ein elektrisches Feld herrscht. Die positiven Ionen werden zu einem Pol, die Elektronen zum anderen Pol gezogen. Auf diese Weise erfolgt jedesmal ein momentaner Elektrizitätsübergang (Stromstoß), wenn ein Teilchen ionisierend wirkt. Der Stromstoß kann verstärkt und registriert werden. Zwar wird bei dieser Methode die Strahlenbahn nicht sichtbar, aber man kann aus der Größe des Stromstoßes direkt die Zahl der in der Kammer erzeugten Ionen und daraus wieder die von der Strahlung auf das Gas übertragene Energie erschließen. Die Registrierung erfolgt zumeist — wenn es sich nur um die *Zählung* der Stöße handelt — durch Übertragung auf ein mechanisches Zählwerk, das dem Werk zur Zählung telephonischer Gespräche ähnelt.

Zählrohr

Die vierte — am häufigsten angewandte — Methode des Strahlungsnachweises stellt eine Weiterentwicklung der eben besprochenen dritten Methode dar. Es ist die Methode des (*Geiger-*)*Zählrohrs* (*Abb. 15*). Anstatt nämlich die Verstärkung des ursprünglichen Stromstoßes gänzlich außerhalb der Ionenkammer elektrisch durchzuführen, kann man schon eine Teilverstärkung innerhalb der Kammer selbst erreichen. Diese erfolgt dann, wenn das angelegte elektrische Feld stark genug ist, um den zu den Polen ziehenden Elektronen solche Geschwindigkeit zu verleihen, daß sie ihrerseits wieder bei Zusammenstößen mit weiteren Atomen der Kammerfüllung diese ionisieren, d. h. Elektronen aus ihnen herausboxen können. Die derart nachträglich entstandenen Elektronen werden ebenfalls durch das elektrische Feld in Bewegung gesetzt, wirken sodann selbst wieder ionisierend auf weitere Atome usw. Es entsteht also eine sich fortpflanzende „Ionenlawine“. Zwar verliert man im Zählrohr, da es sich um einen recht komplizierten Prozeß handelt, die Möglichkeit, die Energie des Strahles aus der Größe des Stromstoßes zu erschließen.



Ludwig Boltzmann



*Der Entdecker des Elektrons J. J. Thomson (links) im
Gespräch mit Ernest Rutherford (rechts) vor dem
Laboratorium in Cambridge*

(Aufnahme D. Shoeners)



*Dimitri Mendelejew
der Schöpfer des Periodischen Systems der Elemente*

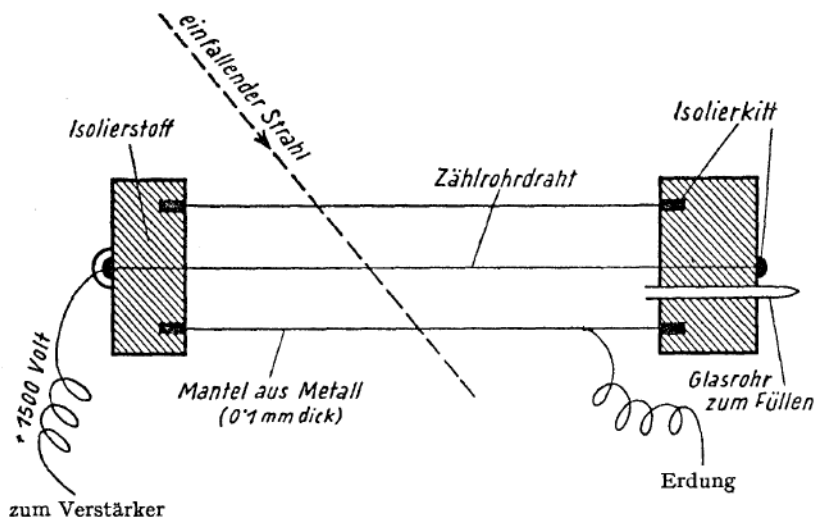


Abb. 15

Geigersches Zählrohr (schematisch)

Das Metallrohr ist mit einer geeigneten Gasmischung gefüllt, die unter vermindertem Druck steht. Beim Durchgang eines Strahls durch das Zählrohr bilden sich aus dem Gas geladene Teilchen (Elektronen und Ionen), die je nach dem Vorzeichen ihrer Ladung zum zentralen Faden oder zum Mantel gezogen werden. Auf dem Wege dahin bilden die primären Teilchen durch Zusammenstoß mit Gasatomen weitere (sekundäre) geladene Teilchen. Der Ladungstransport zum Faden führt zu einer teilweisen Neutralisation von dessen Ladung. Diese Ladungsverminderung wird jedesmal durch einen Verstärker als Stoß registriert. Sodann wird die Spannung wieder hergestellt. Die Zahl der in der Zeiteinheit auftretenden Stöße ist ein Maß für die Zahl der auf das Zählrohr auftreffenden Strahlen.

Dafür aber ist der Stromstoß in jedem Falle so mächtig, daß auch Strahlen sehr geringer Energie mit Sicherheit nachgewiesen („gezählt“) werden können.

Szintillationszähler

Schließlich sei noch kurz ein Gerät genannt, das erst in letzter Zeit entwickelt wurde und sich besonders zur empfindlichen Messung von Gammastrahlen eignet: der *Szintillationszähler* (deutsch etwa: Lichtblitzzähler). Die Zählung von Gammastrahlen mit der Photoplatte ist gar nicht und mit dem *Geiger-Zählrohr* nur mit geringer Ausbeute möglich, weil die Gammastrahlen die Materie gut durchdrin-

gen und daher nur zum kleinen Teil innerhalb dieser Meßgeräte absorbiert werden. Der Lichtblitzzähler enthält eine erhebliche Menge (unter Umständen viele Kilogramm) einer durchsichtigen Substanz, die die Eigenschaft hat, bei der Absorption eines radioaktiven Strahls einen Teil von dessen Energie in die Energie sichtbaren Lichtes umzuwandeln, also jeden einzelnen Absorptionsvorgang durch einen Lichtblitz zu quittieren. Als Szintillator eignen sich bestimmte anorganische Stoffe, z. B. Thalliumjodid, oder organische Stoffe, z. B. Anthrazen. Der Lichtblitz regt eine photoelektrische Zelle an, durch die Lichtenergie in elektrische Energie verwandelt wird; der dabei in der Zelle erzeugte Stromstoß wird verstärkt und durch ein geeignetes Anzeigergerät automatisch registriert.

Wegen der großen Masse des Szintillators kommt ein Großteil der auftreffenden Gammastrahlen trotz ihrer geringen Absorbierbarkeit zur Absorption, und wegen der Durchsichtigkeit des Szintillators können alle Lichtblitze den Szintillator verlassen und die Photozelle anregen. Lichtblitzzähler finden z. B. bei der Bestimmung des Normalgehaltes lebender Menschen an Radium Anwendung, wobei die aus dem Körper austretenden Strahlen gemessen werden. (Jeder Mensch enthält winzige Mengen Radium, weil auch Trinkwasser und Speisen Radium enthalten, das letzten Endes den Gesteinen entstammt.) Eine andere Anwendung ist die Suche nach Uranlagerstätten durch Überfliegen von Gelände und automatische Bestimmung der Stärke der aus dem Erdboden austretenden Gammastrahlung.

Alle Meßgeräte registrieren auch Strahlen, die den stets vorhandenen radioaktiven Beimengungen der Werkstoffe, der Umgebung des Geräts, der Luft usw. entstammen. Auch die kosmische Strahlung wirkt auf die Geräte ein*. Man kann sich gegen diese unerwünschten Einwirkungen durch Umhüllung des Geräts mit einem „Panzer“ aus Blei, der die Strahlen verschluckt, teilweise schützen. Die (durchaus unerwünschte) Anzeige des Geräts in *Abwesenheit* einer zu messenden radioaktiven Probe wird als *Leerwert* des Geräts bezeichnet; für genauere Messungen der Stärke radioaktiver Proben muß stets der Leerwert vom unmittelbar erhaltenen Meßwert abgezogen werden.

* Über die kosmische Strahlung siehe z. B. das Buch des Verfassers „Kräfte des Weltalls“, Globus-Verlag, Wien 1955.

Geologische Altersbestimmung durch Radioaktivität

Bleimethode

Die völlige Unabhängigkeit der Zerfallsgeschwindigkeit radioaktiver Stoffe von den äußeren Umständen ist die Grundlage einer einfachen und verlässlichen Methode zur Bestimmung des Alters von Gesteinen: der *Bleimethode*. Man weiß, welcher Bruchteil einer Uranmenge (Thoriummenge) pro Jahr zerfällt, also sich letzten Endes in Blei verwandelt. Wenn man nun in einem Gestein einerseits den Uran- (den Thorium-) Gehalt, andererseits den Bleigehalt chemisch bestimmt, so kann man aus der Verhältniszahl berechnen, durch welche Zeiträume in diesem Gestein der Zerfall ungestört vor sich gegangen sein muß. Das ist also die Zeit, die seit der Bildung des Gesteins verflossen ist — das *Alter des Gesteins*. Bedingung ist freilich, daß das Gestein nicht schon zu Beginn gewöhnliches Blei (Urblei) enthalten hat, und daß das Gestein keinen durch Bodenwasser bewirkten Laugungsvorgängen ausgesetzt war. Immerhin lassen sich diese Möglichkeiten im allgemeinen praktisch ausschließen. Die Anwesenheit von Urblei erkennt man am Gehalt des Bleis an dem Isotop 204; durch radioaktiven Zerfall entstehen nur die Isotope 206, 207 und 208 des Bleis. Ist im Verhältnis zum radioaktiv gebildeten Blei nur wenig Urblei anwesend, so kann es rechnerisch berücksichtigt werden.

Wir können also jetzt durch unsere auf der Radioaktivität begründeten Methode das Alter geologischer Schichten bestimmen, vor allem von Schichten, in denen sich *Versteinerungen (Fossilien)* gewisser Lebewesen finden. In der folgenden *Tabelle III* sind einige derart erhaltene Daten zusammengestellt. Sie zeigen, in welchen Erdperioden neue Arten von Lebewesen zuerst aufgetreten sind. Die Reihenfolge entspricht derjenigen, die sich aus der *Darwinschen* Entwicklungslehre ergibt. Die weniger entwickelten primitiven Tiere sind also älter als die hochentwickelten Tiere; ähnliches gilt für die Pflanzenwelt. Die ältesten bisher überhaupt festgestellten Gesteine der Erdoberfläche (in Rhodesien) sind nach Aussage der Uran-Blei-Methode 2·5 Milliarden Jahre alt. Sie enthalten natürlich keinerlei Fossilien. Allerdings konnten die einfachsten Lebewesen, die wohl

nur weiche Eiweißklümpchen waren, kaum Spuren hinterlassen. Das Gesamtalter des Lebens auf der Erde ist deshalb bisher unbekannt, doch übersteigt es zweifellos eine Milliarde Jahre.

Tabelle III

Nach der Bleimethode erhaltene Zeittafel

Geologische Epoche	Erstes Auftreten von	Alter der Epoche in Millionen Jahren
Vorkambrium	Würmern	650
Kambrium	Krebsen	420
Silur	Fischen	340
Karbon	Reptilien	240
Trias	einfachen Säugern	160
Jura	Vögeln	120
Eozän	Halbaffen	60
Oligozän	Affen	45
Miozän	Menschenaffen	30
Pleistozän (= Diluvium)	Menschen	1

Helium- und Argonmethode

Eine andere, ebenfalls auf der Radioaktivität beruhende Methode der Altersbestimmung ist die *Heliummethode*. Sie leitet sich daraus ab, daß bei jedem Alphazerfall eines Atoms ein Heliumatom entsteht, daß also der Zerfall eines Uranatoms bis zum Blei insgesamt 8 Heliumatome hervorbringt. Man kann daher aus der in einem Mineral vorliegenden Uran- (oder Thorium-) Menge und der Heliummenge berechnen, welcher Teil der Atome zerfallen ist, über welchen Zeitraum also der Zerfall vor sich gegangen ist. Ein Vorteil der Heliumgegenüber der Bleimethode liegt in ihrer außerordentlichen Empfindlichkeit, zu der sie durch *Paneth* getrieben wurde. Man kann nämlich noch ein milliardstel Kubikzentimeter Helium analytisch bestimmen. Dies geschieht entweder durch die Stärke des Lichtes, das dieses Gas

beim Durchgang eines elektrischen Stromes aussendet, oder durch den Druck, den die Heliummenge in einem geschlossenen Gefäß ausübt. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß jedenfalls in den meisten irdischen Mineralen *alles* Helium — im Gegensatz zum Blei — durch Atomkernzerfall von Uran oder Thorium entstanden ist. Demnach eignet sich die Heliummethode auch für Altersbestimmungen an Mineralen, deren Uran- oder Thoriumgehalt gering und deren Bleigehalt relativ groß ist.

Die große Schwierigkeit bei der Heliummethode besteht darin, daß die meisten Minerale nicht *dicht* sind, sondern im Laufe der Zeit Helium durch ihre Poren entweichen lassen. Man findet dann natürlich bei der Analyse zu wenig Helium und unterschätzt das Alter des Minerals. Doch sind einige Arten von Mineralen wirklich gasdicht. Zu ihnen gehören besonders die gediegenen Metalle. Daher hat die Heliummethode ihre wichtigste Anwendung bei der Altersbestimmung an *Eisenmeteoriten* gefunden. Diese Meteoriten sind vermutlich Trümmer des Eisenkerns eines Planeten, der aus unbekanntem Gründen zersprungen ist. Der Heliumgehalt der Meteoriten ist freilich sehr klein und daher schwer zu bestimmen.

Die Untersuchungen *Paneths* lieferten ursprünglich für viele dieser Meteoriten ein sehr hohes Alter — bis zu 7 Milliarden Jahren. Das war insofern sehr überraschend, als man unserem Sonnensystem als Ganzem kein so hohes Alter zuschreibt. Später zeigte sich aber, daß ein Teil des Meteoritenheliums nicht durch spontanen radioaktiven Zerfall entstanden ist, sondern durch Zertrümmerung von Atomen durch die *kosmischen Strahlen*, denen diese Meteoriten auf ihrer langen Reise durch den Weltraum ausgesetzt sind. Man kann nun dieses „kosmisch entstandene“ Helium auf Grund seiner Isotopenzusammensetzung (es enthält auch einen Anteil an Helium 3) vom „radioaktiv entstandenen“ Helium, das nur Helium 4 enthält, unterscheiden. Auf Grund dieser Unterscheidung hat man den Schluß ziehen können, daß das wahre Alter von Meteoriten einige hundert Millionen Jahre nicht übersteigt. In einigen Fällen hat man wesentlich geringere Alter gefunden. Diese sind aber vielleicht dadurch vorgetäuscht, daß die Meteoriten irgendwann der Sonne nahe kamen, dabei schmolzen und das bis dahin angesammelte Helium entwich.

Schließlich kann man auch, wie *Gerling* in Moskau gezeigt hat, auf Grund des radioaktiven Zerfalls des natürlichen *Kaliums* Altersbestimmungen vornehmen. Dabei bildet sich das Edelgas *Argon*, das wesentlich schwerer als Helium aus dem Mineral entweicht, da seine Atome viel größer sind. Schließlich gibt es auch noch eine *Rubidium-Strontium-Methode*.

Soweit alle diese Methoden auf das gleiche Material angewendet werden können, haben die Altersbestimmungen ähnliche Ergebnisse gezeitigt. Man kann diese Ergebnisse daher mit berechtigtem Vertrauen betrachten. Man darf schließen, daß der irische Bischof *Ussher* das Alter der Erde unterschätzt hat, als er auf Grund der Angaben der Bibel zum Ergebnis kam, daß die Erde am 12. Oktober des Jahres 4004 vor Christi Geburt um 9 Uhr früh geschaffen wurde!

Während alle bisher beschriebenen Methoden auf *natürlicher* Radioaktivität beruhen, nützt die *Kohlenstoffmethode* die in diesem Element durch die (freilich natürliche!) kosmische Strahlung *künstlich* hervorgerufene Aktivität aus (siehe Seite 81).

Die Trennung von Isotopen

Im Zusammenhang mit der Atomkernphysik und der Atomenergie ist oft die *Trennung von Isotopen* höchst wünschenswert, da die Isotope desselben Elements sich stets durch die Eigenschaften ihrer Kerne voneinander unterscheiden. Wie steht es nun mit der Möglichkeit zur Trennung der Isotope?

Auf Seite 52 wurde dargelegt, daß Isotope eines und desselben Elementes sich *chemisch gleich* verhalten, weil die chemischen Eigenschaften der Atome durch die Zahl der Außenelektronen bestimmt sind und diese bei Isotopen gleich ist. Die chemische Gleichheit ist nun nicht in voller Strenge, sondern nur *angenähert* erfüllt. In einem gewissen, wenn auch bescheidenen Maße werden die chemischen Eigenschaften wohl auch durch das *Gewicht* des Atoms mitbestimmt, so daß also schwerere und leichtere Isotope des gleichen Elements geringfügige (quantitative, nicht qualitative) Unterschiede aufweisen.

Diese Unterschiede sind natürlich bei leichten Elementen stärker als bei schweren Elementen ausgeprägt, weil dort die relativen Gewichtsunterschiede zwischen den Isotopen größer sind. Beispielsweise wiegt das Deuteriumatom (D) doppelt soviel, das Tritiumatom (T) gar dreimal soviel wie das Atom des gewöhnlichen Wasserstoffs (H). Dagegen unterscheiden sich die stets über 200 liegenden Atomgewichte der Bleiisotope voneinander höchstens um wenige Prozent. Daher sind auch die chemischen Unterschiede zwischen leichtem, schwerem und überschwerem Wasserstoff $\left(\text{H, D, T, oder } \frac{1}{1}\text{H, } \frac{2}{1}\text{H, } \frac{3}{1}\text{H} \right)$ leichter festzustellen und auszunützen als jene zwischen den Isotopen schwerer Elemente. Der in der Atomtechnik so wichtige schwere Wasserstoff wird ausschließlich durch Isotopentrennung gewonnen. (Wegen ihrer besonderen Bedeutung hat man den beiden schwereren Wasserstoffisotopen ausnahmsweise besondere chemische Symbole verliehen, nämlich dem Deuterium das Symbol D und dem Tritium das Symbol T.)

Der Einfluß des Atomgewichtes auf die chemischen Eigenschaften ergibt sich daraus, daß schwerere Atome sich bei gleicher Temperatur *langsamer bewegen* als leichtere Atome. Nach einem der wichtigsten Sätze der Physik ist (unter gewissen Voraussetzungen) die Bewegungsenergie aller Atome bzw. Moleküle, aus denen sich ein einheitlicher und unter konstanten Bedingungen befindlicher Körper zusammensetzt, im zeitlichen Durchschnitt die gleiche. Wenn daher ein Atom zum Beispiel in einem Gas oder in einem Festkörper — je nach den Stößen, die es empfängt und austeilt — sich auch manchmal langsamer und manchmal schneller bewegen mag, so ist doch, über einen längeren Zeitraum betrachtet, der Mittelwert der Bewegungsenergie aller Atome des gleichen Körpers stets der gleiche (siehe S. 22).

Nun ist aber die Bewegungsenergie eines Körpers nach einem Grundgesetz der Mechanik sowohl durch seine Masse (und daher durch sein Gewicht) als auch durch seine Geschwindigkeit bestimmt. Dies gilt natürlich auch für Atome und Moleküle. Falls daher die Masse *größer* ist (wie dies für die schwereren Isotope eines Elements zutrifft), so muß die Geschwindigkeit entsprechend *kleiner* sein, wenn die Energie der Bewegung, wie eben festgestellt, doch die

gleiche sein soll. Die schwereren Atome bewegen sich also langsamer als die leichteren Atome der gleichen chemischen Art; sie sind eben „schwerfälliger“. Liegen freie Atome als ein Gas vor, so betrifft dieser Geschwindigkeitsunterschied bloß die Fortbewegung; liegen Atome in einer Flüssigkeit oder in einem Festkörper vor, so betrifft er die verschiedenen Schwingungs- und Rotationsbewegungen, deren die Atome in derartigen Körpern fähig sind. Einen solchen Geschwindigkeitsunterschied zeigen die leichteren oder schwereren Atome auch dann, wenn sie nicht frei, sondern zu Molekülen verbunden sind. Dann bewegen sich die schwereren Moleküle (die also die schwereren Isotope enthalten) langsamer als die leichteren Moleküle, obwohl die chemische Formel in beiden Fällen die gleiche ist. Beispielsweise fliegen die Moleküle des leichten Wasserdampfes (H_2O) im Mittel schneller als die des schweren Wasserdampfes (D_2O).

Es ist weiters verständlich, daß langsamere Atome oder Moleküle auch langsamer chemisch *reagieren* als schnellere Moleküle der gleichen chemischen Art. Man kann daher unter bestimmten Bedingungen die leichteren Isotope in jenen Anteilen des Reaktionsprodukts *angereichert* finden, die sich zuerst bilden. In den meisten Fällen mag der „Anreicherungsfaktor“, den man auf diese Weise erhält, nicht sehr groß sein. So liegt er zum Beispiel bei Reaktionen von Kohlenstoff oder Sauerstoff nur zwischen 1·00 und 1·10, obwohl diese Elemente noch zu den leichteren zählen. Das bedeutet, daß jener Teil des Sauerstoffs, der schon reagiert hat, bloß einige Prozent weniger an schwerem Isotop (Masse 18) enthalten wird als der Teil, der noch nicht reagiert hat. Wenn derart geringe Anreicherungsfaktoren für die Isotopentrennung noch ausgenützt werden sollen, so muß nach vielstufigen Verfahren gearbeitet werden, wie es auf Seite 74 für das Uran beschrieben wird.

Verhältnismäßig am leichtesten erfolgt die Anreicherung natürlich bei *Wasserstoff*. So kann man zur Trennung der Wasserstoffisotope eine elektrochemische Reaktion verwenden, nämlich die *Elektrolyse* des Wassers. Im natürlichen Wasser ist das Verhältnis der Wasserstoffisotope etwa 6500:1. Man hat gefunden, daß sich der schwere Wasserstoff bei der Wasserelektrolyse zu elementarem Wasserstoff und Sauerstoff im Rückstandswasser anreichert, während

der leichte Wasserstoff bevorzugt entweicht. In diesem Falle beträgt der Anreicherungsfaktor etwa 5 bis 7! Natürlich muß man das entweichende Gas, sobald einmal die Elektrolyse weit fortgeschritten ist, zurückgewinnen, da dann auch dieses noch — obgleich es gegenüber dem Wasser, aus dem es entsteht, an Deuterium verarmt ist — relativ große Mengen Deuterium enthält. Auch der radioaktive, *überschwere Wasserstoff*, der in der Natur in außerordentlich kleiner Menge vorkommt, wird durch Elektrolyse von Wasser angereichert; er kann erst nach dieser Anreicherung gemessen werden.

Das elektrolytische Verfahren zur Gewinnung von Deuterium erfordert freilich enorme Mengen Strom. Es ist daher nur dort wirtschaftlich, wo die Elektrolyse zum Zweck der technischen Gewinnung von Wasserstoff und Sauerstoff ohnehin betrieben wird, z. B. im wasserkraftreichen Norwegen. Ein Gramm schweres Wasser kostet im „Einzelhandel“ etwa 5 Schilling (80 Pfennig oder 20 Dollarcent). (So fließen an Wien mit der Donau jede Sekunde 250 kg schweres Wasser vorbei, das einen Wert von 1.25 Millionen Schilling darstellen würde, wenn es nicht mit 1,700.000 kg gewöhnlichem Wasser verdünnt wäre!) Für den Bau von *Uranreaktoren* braucht man das schwere Wasser vielfach tonnenweise; es bildet auch einen Rohstoff für die *Wasserstoffbombe*.

Im Zweiten Weltkrieg wurde das in einsamer Höhe gelegene norwegische Werk, in dem schweres Wasser für die Okkupanten erzeugt wurde, einmal von Fliegern zerstört. Ein anderes Mal sprengten norwegische Patrioten einen Schiffstransport in die Luft, mit dem viele Tonnen der wertvollen Flüssigkeit nach Deutschland geschafft werden sollten.

Unter Umständen ist die Gewinnung des schweren Wassers durch *Destillation* billiger als durch Elektrolyse. Beim Verdampfen von Wasser bleibt nämlich das schwere Wasser bevorzugt im Rückstand. Auch in diesem Falle muß der Dampf, sobald einmal die Anreicherung fortgeschritten ist, wiedergewonnen und ins Verfahren zurückgeführt werden. Solche Werke werden in Neuseeland errichtet, wo die zur Destillation erforderliche große Wärmemenge im vulkanischen Erdampf billig zur Verfügung steht. Neuestens wird schweres Wasser „im großen“ zu 60 Dollar pro Kilogramm angeboten.

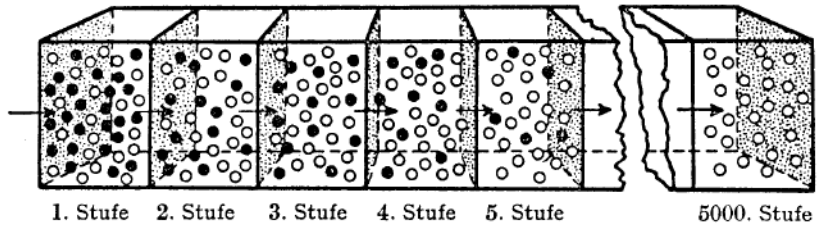


Abb. 16

Das Prinzip der Stufendiffusion zur Isotopentrennung

Das natürlich vorkommende Gemisch der beiden Isotope des Urans, U²³⁵ und U²³⁸, wird durch chemische Verbindung mit dem Element Fluor in den gasförmigen Zustand gebracht. Dieses Gas (Uranhexafluorid) wird nun in besonderen technischen Anlagen durch 5000 Kammern getrieben, die durch sehr engeporeige Scheidewände voneinander getrennt sind. Die in dem Gasgemisch enthaltenen Moleküle mit dem etwas leichteren Uran 235 (○) sind um ein geringes beweglicher und treten daher etwas rascher durch die Wände hindurch als die Gasmoleküle mit dem schwereren Uran 238 (●), die auf dem langen Weg dieser „Stufendiffusion“ daher allmählich zurückbleiben. Nach Passieren der letzten, der 5000. Wand befindet sich in der folgenden Diffusionskammer schließlich praktisch nur noch Gas mit dem leichteren Uran 235.

Die Trennung der *Uranisotope 235* und *238*, der besondere Bedeutung zukommt (siehe Seite 111), ist wegen des geringen Massenunterschiedes auch sehr schwierig. Dennoch wird das Verfahren technisch in großem Maßstab angewandt. Man bedient sich zumeist eines *Diffusionsverfahrens* unter Verwendung der einzigen in Betracht kommenden Uranverbindung, die schon wenig oberhalb Zimmertemperatur gasförmig ist, nämlich des *Uranhexafluorids UF₆*. (Die Arbeit mit dem Gas ist schon chemisch nicht leicht, da es sehr aggressiv ist, durch Feuchtigkeit zersetzt wird und Werkstoffe angreift; bei Zersetzung geht es nicht nur verloren, sondern es verstopft auch noch die Anlagen!) Man läßt das Gas durch dünne, poröse Membranen diffundieren, durch welche die leichteren Moleküle schneller hindurchtreten als die schwereren Moleküle. Der Porendurchmesser darf nur etwa $\frac{1}{100.000}$ Millimeter betragen; die Zahl der Poren ist dafür enorm. Das durchgetretene Gas wird auf der anderen Seite der Membran durch äußerst leistungsfähige Pumpen sogleich fortgeführt. Die theoretische Rechnung zeigt, daß der Anreicherungsfaktor in einer Diffusionsstufe bestenfalls 1·004 beträgt. Daher muß man, um zum Beispiel 99%iges Uran 235 aus

natürlichem Uran (Uran-235-Gehalt: 0,7 %) in Form des Fluorids zu gewinnen, mit 5000 hintereinandergeschalteten Stufen arbeiten (*Abbildung 16*). Tausende Pumpen besonderer Konstruktion werden für ein solches Werk benötigt und die Gesamtfläche der porösen Membranen beträgt viele Hektar. Der Stromverbrauch einer jeden derartigen Anlage entspricht dem einer Großstadt.

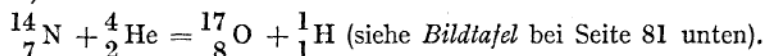
Es existieren auch Anlagen zur Trennung der Uranisotope, die die Verschiedenheit der Isotopenmassen in anderer Weise zu ihrer Trennung ausnützen, doch sind diese andersartigen Anlagen nicht minder kompliziert.

Künstliche Kernreaktionen

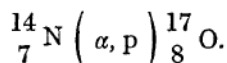
Zwischen 1896 und 1919 waren nur *spontane* Kernreaktionen bekannt. Es war gefunden worden, daß in der Natur außer der erwähnten *Uranreihe* (*Tabelle II*, Seite 61) noch zwei weitere Reihen radioaktiver Elemente existieren, nämlich die *Thoriumreihe* und die Reihe des *Aktinourans* (*Aktiniumreihe*). Außerdem war gefunden worden, daß einige wenige Elemente, die nicht zu diesen Reihen gehören, wie z. B. das *Kalium*, ebenfalls schwache Radioaktivität aufweisen (siehe Seite 61). Es war aber niemals gelungen, künstliche Kernreaktionen zu erzwingen, d. h. die Zusammensetzung eines Kerns durch menschliche Einwirkung zu verändern.

Dies gelang zum erstenmal *Rutherford* im Jahre 1919. *Rutherford* ging von dem Gedanken aus, daß die Energien, die die Bausteine von Atomkernen zusammenhalten, außerordentlich groß sein müssen. Von diesen Energien wird auf Seite 85 ff. die Rede sein. Um also einen stabilen Kern zu erschüttern und seine Zusammensetzung zu verändern (ihn zu „zertrümmern“, wie man irreführenderweise sagt), ist eine Beschießung dieses Kerns mit außerordentlich energiereichen, d. h. schnell bewegten Teilchen erforderlich. Die bei weitem energiereichsten Teilchen, die zu jener Zeit zur Verfügung standen, waren die in radioaktiven Reaktionen emittierten Teilchen, insbesondere die Alphateilchen.

Rutherford ging also daran, stabile Stoffe, z. B. Stickstoff, mit Alphateilchen zu beschießen. Er beobachtete nun, daß in gewissen seltenen Fällen Stickstoffkerne durch die auftreffenden Alphateilchen zerstört wurden. Dabei entstanden schnelle Wasserstoffkerne (Protonen). Die Reaktion war:



(Es gibt auch eine Art *Kurzschrift*, durch die man solche Reaktionsgleichungen einfacher ausdrücken kann, beispielsweise die genannte Gleichung durch



In der Klammer steht zuerst das eindringende, sodann das austretende Teilchen; α ist ein Symbol für das Alphateilchen, also den Heliumkern, p für das Proton, also den Wasserstoffkern.)

Damit war zum erstenmal ein Kern, der sonst noch auf unbestimmte Zeit existiert hätte, durch Menschenhand umgewandelt worden. Freilich wurden für diese Kernreaktionen noch immer Geschosse gebraucht, die selbst radioaktiver Substanz entstammten. Aber schon im Jahre 1932 gelang es *Cockcroft* und *Walton*, elektrisch geladene Atome in Hochspannungsapparaten künstlich so stark zu beschleunigen, daß sie ebenfalls imstande waren, mit stabilen Atomkernen zu reagieren. Als Geschosse eignen sich z. B. geladene Wasserstoff- und Heliumatome, also die Ionen dieser Elemente. Der heute bescheiden anmutende Apparat von *Cockcroft* und *Walton* wurde der Vorläufer einer Reihe mächtiger Maschinen zur Erzeugung energiereicher Geschosse, die zur Umwandlung und Erforschung der Atomkerne dienen. Zu diesen Maschinen gehören die *Zyklotrone* (*Bildtafel* bei Seite 129 oben), die *Betatrone* und die *Synchrotrone*, die heute an vielen Stellen der Welt gleichsam aus dem Boden schießen. Das *Zyklotron* wurde von *Lawrence* in Amerika 1932, das *Synchrotron* von *Weksler* in der Sowjetunion 1945 erfunden.

Mit Hilfe solcher Maschinen sind geladenen Atomen Energien verliehen worden, die die Energien der schnellsten Alphateilchen aus Radioelementen um das Tausendfache übertreffen (siehe *Abb. 17*).

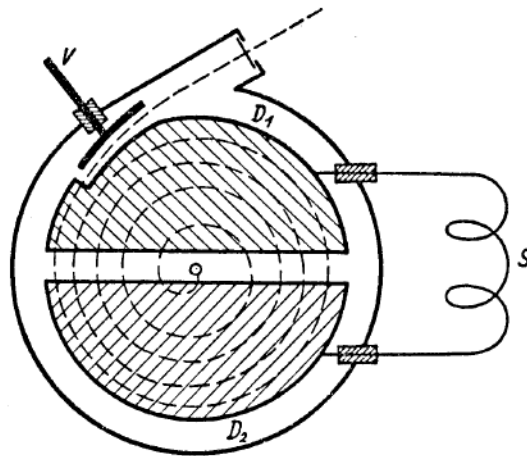


Abb. 17

Prinzip des Zyklotrons (nach Riezler)

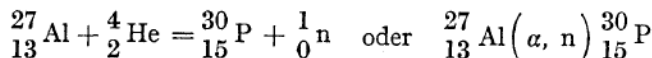
Die horizontale Vakuumkammer, die den Mittelteil des Zyklotrons bildet, ist in der Draufsicht schematisch dargestellt. Oberhalb und unterhalb der Vakuumkammer, also der Bildebene, befinden sich die beiden Pole eines starken Elektromagneten. In der Mitte der Vakuumkammer werden durch eine besondere Vorrichtung, die Ionenquelle, Atome elektrische Ladungen verliehen, die Atome also in Ionen verwandelt. Die beiden hohlen Halbscheiben D_1 und D_2 sind entgegengesetzt auf etwa 50000 Volt elektrisch geladen. Der Ladungssinn wird mit Hilfe des Hochfrequenzgerätes S viele Millionen Male in der Sekunde gewechselt, so daß die positiv geladenen Ionen abwechselnd in die eine Halbscheibe und in die andere Halbscheibe gezogen werden. Durch die Wirkung des magnetischen Feldes bewegen sie sich dabei in Spiralbahnen, gewinnen aber beim jedesmaligen Überschreiten der vertikalen Mittelebene Energie. Schließlich wird die Geschwindigkeit der Ionen so groß, daß sie an den Rand der Halbscheibe geraten und dort durch den elektrisch geladenen Deflektor (Ablenker) V so aus der Richtung geworfen werden, daß sie die Vakuumkammer durch ein dünnes, aber vakuumdichtes Metallfenster verlassen können. Durch die vielfache Beschleunigung haben die Ionen schließlich eine Geschwindigkeit und Energie, als wären sie einer beschleunigenden Spannung von vielen Millionen Volt ausgesetzt gewesen; tatsächlich aber beträgt die Spannung zwischen D_1 und D_2 nur 100000 Volt, so daß das Problem der Isolierung keine übermäßige Schwierigkeit bietet.

Das *Bevatron* in Kalifornien liefert den Teilchen Energien entsprechend 6 Milliarden, das *Phasotron* in der UdSSR entsprechend 10 Milliarden Volt. Beide Geräte arbeiten nach dem Synchrotron-Prinzip. Der Magnet des Phasotrons wiegt 36.000 Tonnen, soviel wie ein Schlachtschiff, und dürfte 1 Milliarde österr. Schilling = 160 Millionen D-Mark = 40 Millionen Dollar kosten.

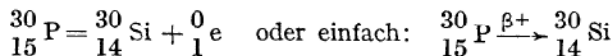
Die Atome tragen dann so viel Energie, als hätten sie Temperaturen von vielen Billionen Grad. Durch Beschuß mit den raschen

Atomen kann man die kompliziertesten und interessantesten Kernreaktionen erzwingen. Übrigens verlieren die leichten Atomkerne ihre sämtlichen Hüllenelektronen, wenn sie sich sehr rasch bewegen.

Die von *Rutherford* und seinen Schülern erreichten Kernreaktionen sowie alle anderen bis zum Jahre 1934 erzwungenen Reaktionen erfolgten augenblicklich, d. h. während unmeßbar kurzer Zeit nach dem Auftreffen des Geschosses auf den Atomkern. Nach Ende dieser überaus schnell verlaufenden Reaktionen waren also wieder nur stabile Kerne vorhanden. Im Jahre 1934 gelang nun in Paris dem jugendlichen *Frédéric Joliot* und seiner Frau *Irène Curie* (*Bildtafel* bei Seite 144 oben), einer Tochter des Ehepaares *Curie*, eine Entdeckung von außerordentlicher Tragweite. Sie fanden nämlich, daß in gewissen künstlich erzwungenen Kernreaktionen *instabile Kerne* entstehen. Diese Kerne zerfallen dann ebenso wie die in der Natur vorkommenden radioaktiven Kerne *spontan* im Laufe einer gewissen Zeit, z. B. unter Betastrahlemission. *Joliot* und *Irène Curie* beobachteten, daß bei der Beschießung von Aluminium mit Alphateilchen eine Kernreaktion nach der Gleichung



eintritt. Der entstehende Kern ist nicht ein Kern des in der Natur vorkommenden stabilen Phosphorisotops, der die Zusammensetzung ${}_{15}^{31}\text{P}$ hat, sondern ein instabiler Phosphorkern, der mit einer Halbwertszeit von $2\frac{1}{2}$ Minuten zerfällt. *Dieser Phosphor* war also das *erste künstliche Radioelement*. Bei seinem spontanen Zerfall bildet sich ein (stabiler) Siliziumkern und ein (positives) Elektron:



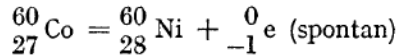
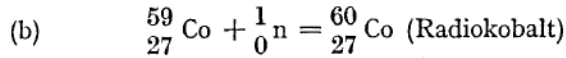
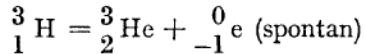
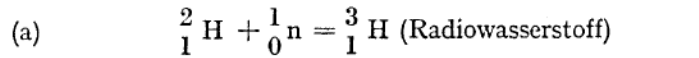
Diese *positiven Elektronen* (*Positronen*) leben übrigens nicht lange, da sie beim Auftreffen auf ein gewöhnliches (negatives) Elektron dieses *neutralisieren*, wobei beide Elektronen verschwinden. Die beiden Körperchen lösen sich in energiereiche Lichtstrahlung auf; ihr Massenwert bleibt in den entstandenen Lichtteilchen (Photonen) nach dem Masse-Energie-Äquivalenzprinzip (siehe Seite 106) erhalten.

Nach dieser Pionierentdeckung des Ehepaares *Joliot-Curie* wurden, z. T. unter Benützung von Maschinen vom Typus des *Zyklotrons*, in rascher Folge viele andere *Radioelemente künstlich hergestellt*. Heute sind mehr als 1000 solche künstliche Radioelemente bekannt. Radioaktive Isotope eines jeden Elementes sind erhalten worden. Dadurch ist der praktische Anwendungsbereich radioaktiver Methoden in Wissenschaft und Technik ganz außerordentlich erweitert worden.

Ein besonders geeignetes Geschoß zur „*Synthese von Radioelementen*“, wie *Joliot* die Methode genannt hat, ist das *Neutron*. Elektrisch geladene Teilchen, wie z. B. das Alphateilchen, haben nämlich ihre Schwierigkeit, einem Kern so richtig nahe zu kommen. Das ist aber die Voraussetzung dafür, daß sie mit dem Kern reagieren können. Die Schwierigkeit liegt darin, daß der Kern ja selbst positiv geladen ist und daher das Geschoß elektrisch abstößt. Das Geschoß kann nur dann in den Kern eindringen, wenn es von vornherein eine gewaltige Energie mitbringt, also sehr schnell bewegt ist. Es muß eindringen, noch ehe es einen zu großen Teil der Energie, die es im spontanen radioaktiven Atomzerfall oder in einer Maschine (*Zyklotron*) erhalten hat, verliert. Daher ist die Ausbeute bei Synthesen mit Hilfe geladener Teilchen, z. B. eben Alphateilchen, immer verhältnismäßig klein.

Anders mit Neutronen. Sie haben keine elektrische Ladung, werden daher durch die Atomkerne nicht abgestoßen und dringen mühelos in sie ein. Daher bewirkt fast jedes Neutron, das irgendwo aus einem Atomkern herausgeschlagen wird, früher oder später eine Atomkernreaktion mit einem anderen Kern. Andererseits findet man gerade aus diesem Grunde auch nur wenige Neutronen in der Natur. Kaum entstehen sie irgendwie, z. B. durch den Anprall von kosmischer Höhenstrahlung auf Atomkerne, so werden sie wieder irgendwo anders eingefangen. Die Neutronen müssen daher für jede Anwendung eigens erzeugt, d. h. aus Kernen losgelöst werden. Als mächtigste Anlage zur Erzeugung von Neutronen werden wir den *Uranreaktor* kennenlernen.

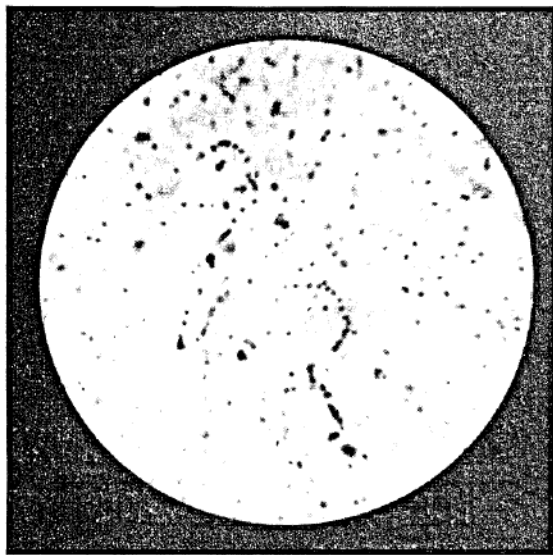
Nachstehend seien zwei Beispiele für *Kernreaktionen* angeführt, die durch *Neutronen* verursacht werden und zu *betaaktiven* Körpern führen.



Die Halbwertszeiten der betaaktiven Produkte betragen 12 Jahre für Radiowasserstoff (a), bzw. 5·3 Jahre für Radiokobalt (b). Der *Radiowasserstoff* (auch Tritium genannt) gesellt sich also zu den beiden stabilen Wasserstoffisotopen (*Abb. 12*, Seite 52). *Radiokobalt* findet wichtige praktische Verwendung, ist aber auch als Bestandteil der Kobaltbombe vorgeschlagen worden.

Die neue Alchimie

Die Änderung der Kernladungszahl durch spontane oder künstliche Kernreaktion bedeutet eine Umwandlung des betreffenden chemischen Elements, da der chemische Charakter jedes Elements durch die Ladungszahl seiner Atomkerne bestimmt wird. Eine solche Umwandlung wird als *Transmutation* bezeichnet (Seite 41). Besonders die Transmutation von Quecksilber in Gold war das mit großer Geduld und auch oft mit den Mitteln der Zauberei verfolgte Ziel der Alchimisten. Heute wissen wir, warum jene Bestrebungen der alten Alchimisten scheitern mußten. Ihnen standen weder die Mittel zum Nachweis der natürlichen spontanen Kernreaktionen noch die Mittel zur künstlichen Erzwingung von Kernreaktionen zur Verfügung. Als im 19. Jahrhundert die Fruchtlosigkeit der Bemühungen der Alchimisten erkannt worden war, war man übereilt geneigt, die Transmutation überhaupt für unmöglich zu halten. Heute sehen wir vor uns die rapide Entwicklung der *gelenkten Transmutation*.



Bahnspur eines Betastrahls in einer photographischen Emulsion

Betastrahlen werden wegen der geringen Elektronenmasse beim Durchgang durch Materie stark gestreut (aus der Richtung geworfen).

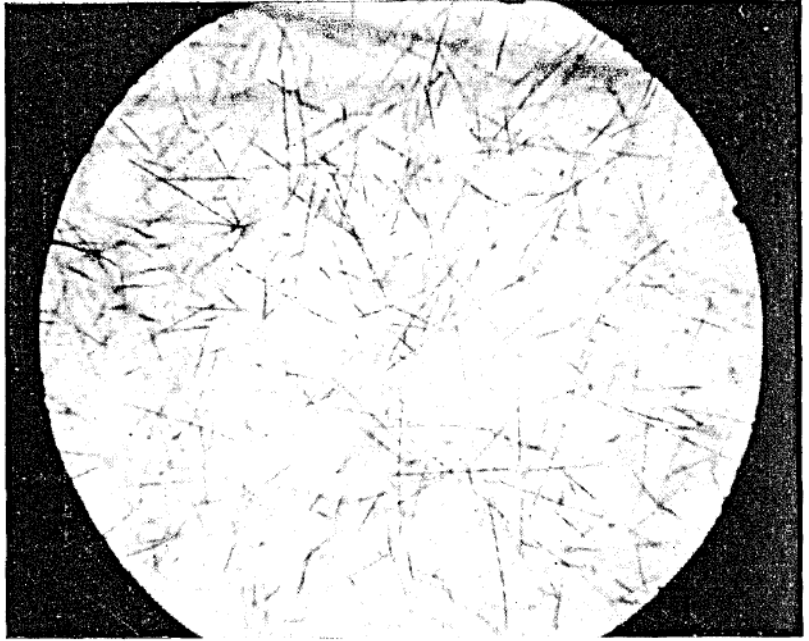
(Aufnahme Jenkner und Broda)



Bahnspur eines Alphastrahls in einer photographischen Emulsion

Die radioaktive Substanz war in die Gelatine eingelagert worden. — Die unentworfene Bahnspur unten liegt in einer anderen Ebene und erscheint daher unscharf. Die isolierten Körner sind vom Prozeß der Emulsionsherstellung her oder durch Streustrahlung geschwärzt. 1000fache Vergrößerung.

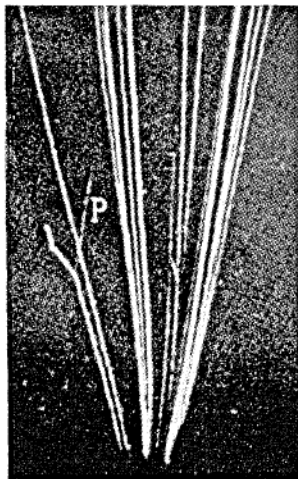
(Aufnahme Jenkner und Broda)



Oben: *Bahnspuren der Alphastrahlen von Polonium in der photographischen Emulsion*

Zahlreiche, nach allen Richtungen verlaufende Spuren sind sichtbar.

(Aufnahme Epstein und Broda)



Links: *Spuren von Alphastrahlen in der Nebelkammer*

Durch einen der Alphastrahlen (ganz links) ist ein Stickstoffatomkern umgewandelt worden. Man sieht die feine Spur p des bei der Umwandlung entstandenen Wasserstoffkerns (Protons). Die dicke Spur nach der Reaktionsstelle ist die Spur des entstandenen Sauerstoffkerns.

(Aufnahme Blackett)

einer neuen — diesmal streng wissenschaftlichen — Alchimie. Nicht die Erzeugung von Gold ist allerdings das Ziel der modernen Alchimisten. Sie erzeugen Stoffe, die weitaus größeren wirklichen Wert als Gold besitzen: radioaktive Stoffe und Rohstoffe für die Atomtechnik.

Historische Altersbestimmung durch Radioaktivität

Auch die *künstliche* Radioaktivität ist in den Dienst der Altersbestimmung gestellt worden. Die neue Methode ergänzt die Blei- und Heliummethode (Seite 67) in wirkungsvoller Weise. Diese beiden Methoden, die auf der natürlichen Radioaktivität beruhen, eignen sich nämlich nur für Bestimmungen sehr hoher Alterswerte, weil Uran und Thorium so langsam zerfallen, daß sie in der Zeiteinheit nur wenig Blei und Helium liefern. (Ähnliches gilt für die anderen früher beschriebenen Verfahren.) Vor einigen Jahren wurde von *Libby* eine weitere Methode zur Altersbestimmung begründet, die sich zur Bestimmung relativ kurzer Zeiträume — und nur dieser — eignet. Sie stützt sich auf den Zerfall des *Radiokohlenstoffs*.

Diese äußerst interessante Methode geht davon aus, daß sich im Luftraum der Erde durch Einwirkung *kosmischer Strahlen* Radiokohlenstoff bildet. Die kosmischen Strahlen erzeugen in der Atmosphäre Neutronen, die dann hauptsächlich vom atmosphärischen Stickstoff durch die Reaktion ${}^{14}_7\text{N} (n, p) {}^{14}_6\text{C}$ eingefangen werden.

Der entstehende Kohlenstoff 14, der in Form von Kohlensäure vorliegt, ist mit einer Halbwertszeit von 5570 Jahren betaaktiv. Seine Lebensdauer ist so groß, daß er — an welcher Stelle er auch gebildet wurde — sich gleichmäßig mit der gesamten Kohlensäure vermischt, die im Luftraum oder auch gelöst im Ozean enthalten ist. Da die Pflanzen und damit letzten Endes auch die Tiere die Kohlensäure zum Aufbau ihrer Körper verwenden, ist aller in ihnen enthaltene Kohlenstoff praktisch im gleichen Ausmaß radioaktiv wie die Kohlensäure selbst.

Beim *Tod* des Lebewesens oder eines Organs hört jedoch der Nachschub von neuer radioaktiver Kohlensäure aus der Atmosphäre auf. Beispielsweise unterliegt ein Stück totes Holz keinem Stoffwechsel mehr. Da der Radiokohlenstoff nun nicht mehr ergänzt wird, kann sein spontaner Zerfall im toten Gewebe nicht mehr wettgemacht werden, und die Aktivität des Kohlenstoffs (etwa im Holz) nimmt dann mit der Halbwertszeit des Radiokohlenstoffs ab. Man kann daher offenbar durch Messung der verbliebenen Aktivität bestimmen, wieviel Zeit seit dem Ende des Stoffaustausches mit der Atmosphäre, also seit dem Tod des Gewebes, vergangen ist.

Genauere Messungen dieser Art sind ganz besonders schwierig, weil die Aktivität der Luftkohlendioxid und daher auch der belebten Substanz von vornherein sehr gering ist. Zur Messung sind deshalb überaus komplizierte Geräte erforderlich. Selbst mit ihrer Hilfe kann man den Zerfall des Kohlenstoffs bisher höchstens über etwa neun Halbwertszeiten verfolgen, also etwa fünfzig Jahrtausende erfassen. Die Methode umfaßt immerhin die *ganze menschliche Geschichte* und einen wichtigen Teil der menschlichen *Vorgeschichte*.

Zuerst hat man natürlich das neue Verfahren an Objekten bekannten Alters erprobt. Solche Objekte sind z. B. bestimmte ägyptische Altertümer, deren Alter den Historikern bekannt ist, wie etwa Mumien. Ein anderes Objekt ist das Kernholz uralter Bäume. Das Kernholz ist bekanntlich totes Gewebe und dient nur mehr dem Wassertransport. Daher ist die Radioaktivität des Kernholzes geringer als beispielsweise die der Zweige des gleichen Baumes. Das (durchschnittliche) Alter des Kernholzes läßt sich aber durch Zählung der Jahresringe genau ermitteln. Diese Probebestimmungen an ägyptischen Mumien und dem Kernholz von Mammutbäumen (bis zu 3000 Jahre alt) haben so günstige Resultate gebracht, daß man heute die Kohlenstoffmethode mit vollem Vertrauen zur Bestimmung von Gegenständen unbekanntem Alters verwendet. *Tabelle IV* gibt einige wichtige Ergebnisse, die auf diese Weise erhalten wurden.

Bisher konnte man nur jene geschichtlichen Ereignisse „datieren“ — also ihnen Daten zuschreiben —, die in den Zeitraum fallen, der von der *geschriebenen Geschichte* umfaßt wird. Im Zeitraum der *Vorgeschichte* war man auf grobe Schätzungen angewiesen; in vielen

Tabelle IV

Altersbestimmungen nach der Kohlenstoffmethode

Gegenstand	Alter in Jahren	
	von Historikern angegeben	durch Radioakti- vität bestimmt
Holz aus dem Grabmal des Pharao Sesostri III (Ägypten)	3750	3620 ± 180
Weizenkörner aus dem Nildelta .	?	6095 ± 250
Schneckenschalen aus vorge- schichtlichem Dorf (Irak) ...	?	6700 ± 320
Buch Jesaias (Totes Meer)	?	1920 ± 200
Holzkohle aus Höhle mit Wand- malerei (Dordogne, Frank- reich)	?	11100 ± 480
Eiszeitliche Pflanzen (Südeng- land)	?	17000 oder mehr
Exkreme des ausgestorbenen Riesenfauertieres (Chile)	?	10800 ± 400
Gewebe indianische Sandalen (Oregon)	?	9050 ± 350

Fällen war nicht einmal bekannt, welches von einem Paar von Ereignissen früher und welches später stattgefunden hat. Hier ist nun durch die beschriebene Radiokohlenstoffmethode, deren Möglichkeit bis zur Entdeckung des Radiokohlenstoffs nicht vorhergesehen werden konnte, plötzlich ein weites Tor aufgestoßen worden. Dies ist eines der zahlreichen Beispiele in der Geschichte der Wissenschaft, wo Forschungen auf einem Gebiet plötzlich ungeahnte Auswirkungen auf ein ganz anderes Gebiet haben — hier die Erforschung der Radioaktivität und der kosmischen Strahlen auf Geschichts- und Vorgeschichtskunde.

Nur anhangsweise sei erwähnt, daß *Libby* neuerdings auch das Schicksal des *Radiowasserstoffs* (Tritiums) untersucht hat, der gleichfalls beim Aufprall der kosmischen Strahlen auf die irdische Lufthülle entsteht. Die Menge an Radiowasserstoff ist freilich viel kleiner als

die an Radiokohlenstoff, so daß der Wasserstoff vor der Messung an dem radioaktiven Isotop *angereichert* werden muß (siehe Seite 73).

Aus der Messung des Tritiumgehaltes von Wasserstoff lassen sich ebenfalls interessante Schlüsse ziehen. Diese Schlüsse gründen sich darauf, daß die Halbwertszeit des Tritiums (12 Jahre) so kurz ist, daß — im Gegensatz zum Radiokohlenstoff — keine vollkommene Durchmischung an der Erdoberfläche stattfindet. Daher verliert Wasserstoff, der mit der Erdatmosphäre, dem Entstehungsort des Tritiums, nicht in Berührung ist, rasch seine Radioaktivität. Beispielsweise ist das Tiefenwasser des *Ozeans* inaktiv. *Quellwasser* ist aktiv, wenn es eingesickertem Regen entstammt, aber inaktiv, wenn es aus „juvenilem“ Wasser aus den Tiefengesteinen der Erdkruste besteht; so ist der *Erddampf*, mit dem in Italien die riesigen Erdkraftwerke betrieben werden, inaktiv. Auch kann man abschätzen, ob *Regenwasser* aus Wolken kommt, die durch Verdunstung von Meerwasser oder aber von „Landwasser“ entstanden sind; das letztere ist viel stärker aktiv als das erstere. Schließlich kann man sogar das Alter von *Weinen* bestimmen, weil sie natürlich während ihrer Lagerung in Flaschen und Fässern Aktivität verlieren!

Die Energien der Atomkerne

Die Analogie zwischen chemischen Reaktionen und Kernreaktionen

Wir haben im vorigen Abschnitt begonnen, eine Analogie zwischen den chemischen Reaktionen und den Atomkernreaktionen zu ziehen. Bei den chemischen Reaktionen handelt es sich um Neuverteilung von Elektronen zwischen den Atomhüllen verschiedener Atome, bei Atomkernreaktionen um Neuverteilung von Kernbausteinen (Nukleonen) zwischen verschiedenen Atomkernen. Die Analogie soll nun durch einfache zeichnerische Darstellung noch deutlicher gemacht werden. *Abb. 18* zeigt die schematische Darstellung zweier besonders einfacher chemischer Reaktionen und einer besonders einfachen Kernreaktion. Wir führen *zwei* chemische Reaktionen an, damit jede der beiden auf Seite 42—45 beschriebenen Reaktionstypen (Kovalenz und Elektrovalenz) vertreten sei.

Wir wählen zunächst (*a*) die Bildung eines *Wasserstoffmoleküls* aus zwei Wasserstoffatomen, die unter Betätigung von Kovalenz erfolgt. Als Beispiel für die Bildung einer Verbindung durch Elektrovalenz nehmen wir (*b*) die Vereinigung eines Atoms des Leichtmetalls Lithium mit einem Atom Wasserstoff zum sogenannten *Lithiumhydrid*, einem salzartigen Stoff. Der Einfachheit halber berücksichtigen wir im Bild nur die Isotope ${}^6_3\text{Li}$ und ${}^1_1\text{H}$. Schließlich wählen wir (*c*) als Beispiel einer Atomkernreaktion die Bindung eines Neutrons durch einen Wasserstoffkern unter Bildung eines *Deuterons*.

Sowohl bei chemischen Reaktionen als auch bei Kernreaktionen müssen die Summen der Ladungen und die Summen der Massenzahlen vor und nach der Reaktion je die gleichen sein, denn sowohl

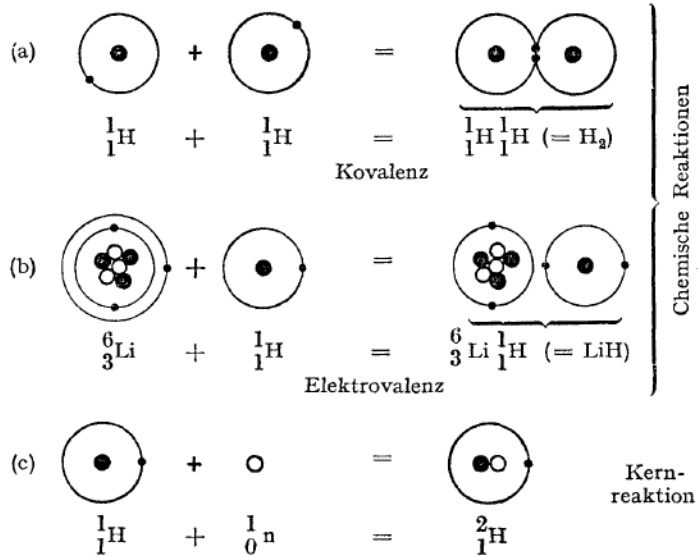


Abb. 18

Analogie zwischen chemischen Reaktionen und Kernreaktionen

- ... Proton
- ... Neutron
- ... Elektron

Ladungen wie auch Massen haben sich nur verschieden angeordnet. Bei Reaktion (a) haben wir vorher und nachher zwei Protonen und zwei Elektronen, bei Reaktion (b) vier Protonen, drei Neutronen und vier Elektronen, bei Reaktion (c) ein Proton, ein Neutron und ein Elektron. Wir sehen: Bei den chemischen Reaktionen (a) und (b) verbinden (oder trennen) sich lediglich die Elektronen der Atomhülle, bei der Kernreaktion (c) dagegen auch die Nukleonen.

Wir wollen uns aber jetzt auf einen zweiten Analogiepunkt konzentrieren. Es handelt sich um die *Energieentwicklung* bei den beiden Klassen von Reaktionen. Die chemischen Reaktionen sind stets mit Energieänderungen verbunden. Die Energieentwicklungen

oder *Wärmetönungen*, wie die Chemiker oft sagen, können auf das Kilogramm Material bezogen werden. Wir wissen z. B. durch Messungen, daß ein Kilogramm Kohlenstoff bei der Verbrennung in Luft oder in Sauerstoff ($C + O_2 = CO_2$) 8000 große Kalorien* liefert. Die Verbrennung des Kohlenstoffs ist eine jener chemischen Reaktionen, die die meiste Energie liefern. Daraus und aus der Häufigkeit des Kohlenstoffs in Form von Kohle (die allerdings außerdem noch gewisse Mengen Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff usw. enthält) erklärt sich die besondere Bedeutung des Kohlenstoffs in der Energiewirtschaft.

Die Kernreaktionen haben nun mit den chemischen Reaktionen die Eigenschaft gemein, daß auch sie unter Wärmetönungen verlaufen. Allerdings sind die Wärmetönungen der Kernreaktionen *ganz außerordentlich viel größer* als die Wärmetönungen der chemischen Reaktionen. Ganz grob läßt sich sagen, daß sie oft hunderttausend- bis millionenmal größer sind als die chemischen Wärmetönungen. Dies ist auch der Grund, weshalb man der Atomenergie — genauer ausgedrückt: der Kernenergie — eine besondere Zukunft voraussagt; aus dem gleichen Grunde ist es verständlich, daß die Wirkungen der Atombombe so entsetzlich verheerend sind.

Nun könnte wohl der Einwand gemacht werden, daß z. B. das Uran doch ein ganz harmloses Material sein müsse, denn seine Verbindungen sind ein Jahrhundert hindurch in Glasflaschen ruhig auf den Arbeitstischen der Chemiker gestanden und niemals haben diese auch nur bemerkt, daß mit dem Uran etwas nicht in Ordnung sei.

Dies kommt aber einfach daher, daß die spontane Kernreaktion des *Urans*, also sein Alphazerfall, so *außerordentlich langsam verläuft*. Die Physiker können zwar mit großer Genauigkeit bestimmen, daß beim Zerfall eines Kilogramms Uran 400 Millionen große Kalorien frei werden, also 50.000mal mehr als bei der Verbrennung eines Kilogramms bester Steinkohle. Aber die Kohle können wir innerhalb kurzer Zeit verbrennen, während das Uran 4·5 Milliarden

* Eine *große* Kalorie ist die Wärmemenge, die zur Erwärmung eines Liters (Kilogramms) Wasser um 1° Celsius nötig ist. Eine *kleine* Kalorie ist der tausendste Teil einer großen Kalorie und reicht daher zur Erwärmung eines Kubikzentimeters (Gramms) Wasser um 1° Celsius hin.

Jahre braucht, ehe es zur Hälfte zerfallen ist (vgl. S. 60). In einem Tag erzeugt 1 kg *Uran* nur 0-00017 Kalorien. Der spontane Zerfall des einzelnen Uranatoms ist zwar eine mit großer Wärmeentwicklung verlaufende Reaktion, wie dies einer Kernreaktion entspricht; aber ein Zerfall tritt eben nur sehr selten ein. Häufiger erfolgt der Zerfall von *Radium*kernen, da ja die Halbwertszeit des Radiums dreimillionenmal kleiner ist als die Halbwertszeit des Urans. So entwickelt 1 kg Radium bereits 600 Kalorien pro Tag, wenn nur das Radium für sich allein in Betracht gezogen wird, und es entwickelt sogar 3300 Kalorien, wenn die noch bedeutendere Wärmeentwicklung der radioaktiven Folgeprodukte des Radiums mitgezählt wird, die sich im Präparat ansammeln. Da aber noch niemand mehr als einige Gramm Radium besessen hat, kann auch diese Wärmequelle nicht viel versprechen.

Das radioaktive Gleichgewicht

Um die Möglichkeit einer Nutzbarmachung der Atomkernenergie beim spontanen Zerfall radioaktiver Stoffe beurteilen zu können, muß man ganz allgemein folgendes überlegen. Das Blei entsteht in der Natur auf dem Wege über verschiedene Zwischensubstanzen aus dem Uran (siehe S. 61). Betrachten wir nun etwa ein Stück Uranerz, das einige Millionen Jahre ruhig in der Erde gelegen ist. Wir haben auf S. 67 darauf hingewiesen, daß während dieser Zeit die Menge an Endprodukt (Blei) ständig zunimmt. Demgegenüber müssen sich die *Zwischenprodukte*, darunter auch das Radium, mit dem Uran ins sogenannte *radioaktive Gleichgewicht* (*Zerfallsgleichgewicht*) setzen. Was ist damit gemeint? Es bedeutet, daß sich nach einer gewissen Zeit in dem Erz von selbst ein Zustand einstellen muß, in dem die Anzahl der Radiumzerfälle pro Zeiteinheit gleich der Anzahl der Uranzerfälle pro Zeiteinheit sein wird. Wäre nämlich die Anzahl der Radiumzerfälle größer, so könnte das Radium vom Uran offenbar nicht in dem Ausmaß nachgeliefert werden, wie es zerfällt. Die Menge des Radiums würde daher ständig abnehmen.

Im gleichen Maße würde die Anzahl der Zerfälle des Radiums pro Zeiteinheit abnehmen. Diese Abnahme kann erst ein Ende finden, wenn die Anzahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Radiumkerne mit der Anzahl der sich bildenden Kerne — also auch mit der Anzahl der zerfallenden Urankerne — übereinstimmt. Was geschieht umgekehrt, wenn die Anzahl der Radiumzerfälle kleiner ist als die Anzahl der Uranzerfälle — wie dies zu Beginn des „Versuches“, also unmittelbar nach Bildung der Erze, zutreffen muß? Dann muß das Radium an Menge zunehmen, gleichzeitig wird auch die Anzahl der Radiumzerfälle je Zeiteinheit zunehmen — und zwar so lange, bis Gleichheit der Zerfallsgeschwindigkeiten von Uran und Radium hergestellt ist. Diesen Zustand gleicher Zerfallsgeschwindigkeit von Muttersubstanz und Tochtersubstanz bezeichnet man als das *radioaktive Gleichgewicht (Zerfallsgleichgewicht)*. Radioaktives Gleichgewicht zwischen Ausgangsstoff und allen Gliedern der von ihm abstammenden *radioaktiven Reihe* herrscht in allen ungestört lagernden radioaktiven Mineralen. Somit sind in einem ungestörten Mineral gleich viele Curie (siehe Seite 60) *eines jeden Gliedes* der radioaktiven Reihe vorhanden, also ebenso viele Curie Uran wie Radium wie Radium-Emanation wie Polonium usw.

Nun gehen wir einen Schritt weiter. Wir wissen, daß Stabilität und Halbwertszeit des Radiums geringer sind als jene des Urans (siehe S. 61). Die Wahrscheinlichkeit, daß ein einzelnes willkürlich herausgegriffenes Radiumatom in der nächsten Minute zerfallen wird, ist dreimillionenmal größer als die entsprechende Wahrscheinlichkeit des Zerfalls eines einzelnen Uranatoms. Wie kann man nun diese Tatsache mit der Tatsache des radioaktiven Gleichgewichtes in Übereinstimmung bringen? Wir fordern ja, daß in einem ruhenden Erz die Gesamtzahl der Zerfälle je Zeiteinheit in jeder Stufe der radioaktiven Reihe gleich sein soll; gleichzeitig aber, daß die Wahrscheinlichkeit des Zerfalls für die Einzelatome in jeder Stufe der Reihe verschieden sein soll. Um diese beiden Forderungen miteinander in Einklang zu bringen, müssen wir offenbar annehmen, daß von den kurzlebigen Gliedern der Zerfallsreihe entsprechend weniger vorhanden ist als von den langlebigen. *Radioaktives Gleichgewicht* kann also zwischen Uran und Radium nur dann bestehen, *wenn die vorhandenen Mengen*

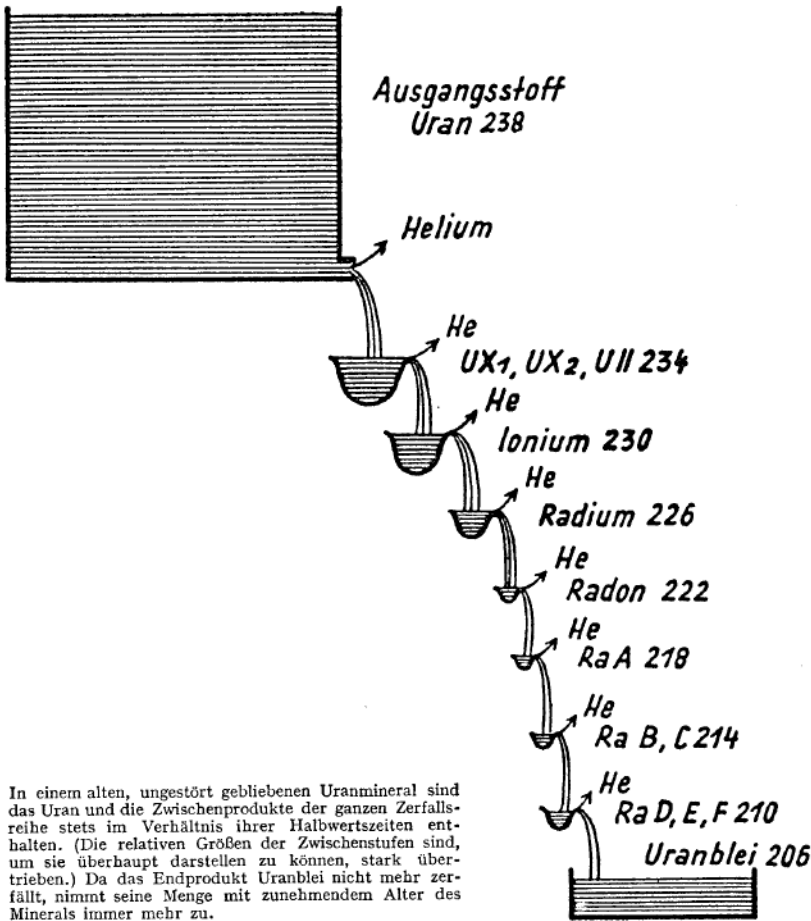
zueinander im Verhältnis der beiden Halbwertszeiten stehen, d. h. also, wenn dreimillionenmal mehr Uran als Radium vorhanden ist. Auf drei Kilogramm Uran kommt daher im Gleichgewicht ein Milligramm Radium, auf drei Tonnen Uran ein Gramm Radium (Abb. 19). Erst drei Tonnen Uran haben die Aktivität 1 Curie. In der Tabelle V sind die Gewichte einiger natürlicher Radioelemente aus der Zerfallsreihe des Urans zusammengestellt, die jeweils die gleiche Aktivität aufweisen. Ähnliche Tabellen lassen sich für die Glieder anderer natürlicher radioaktiver Reihen und auch für die künstlichen Radioelemente aufstellen.

Tabelle V
Radioaktives Gleichgewicht

Element	Gewicht, das die Aktivität 1 Curie besitzt (Näherungswerte)
Uran	$3 \cdot 10^6$ g = 3 Tonnen
Radium	1 g = 1 Gramm
Emanation	$6 \cdot 10^{-6}$ g = 6 Mikrogramm
Radium C'	$3 \cdot 10^{-15}$ g = 3 Billionstel Gramm
Polonium	$2 \cdot 10^{-4}$ g = 0,2 Milligramm

Jeweils drei Tonnen unnützes Uran und dazu noch viel totes Gestein („Gangart“) mußten also in den Bergwerken gefördert werden, damit ein Gramm Radium gewonnen werden konnte. Seit 1939, also seit der Entdeckung der Kernspaltung, ist das Uran hingegen das Hauptprodukt geworden. Schließlich hat sich das Radium infolge der Konkurrenz der künstlich erzeugten Radioelemente in ein schwer absetzbares Abfallprodukt verwandelt.

Bisher war nur von ungestört ruhendem Gestein (Erz) die Rede. Man begreift aber unschwer, daß die Bedingung des radioaktiven Gleichgewichtes auch für die Erde als Ganze gelten muß. Denn offenbar kann sich an der insgesamt vorhandenen Menge Radium nichts ändern, wenn es z. B. stets durch Wässer aus dem Uranmineral herausgelaugt wird. Es wird nur an einen anderen Ort geführt. Wir dürfen also schließen, daß *auch in der Erde als Ganzer dreimillionenmal mehr Uran als Radium vorhanden ist.*



In einem alten, ungestört gebliebenen Uranmineral sind das Uran und die Zwischenprodukte der ganzen Zerfallsreihe stets im Verhältnis ihrer Halbwertszeiten enthalten. (Die relativen Größen der Zwischenstufen sind, um sie überhaupt darstellen zu können, stark übertrieben.) Da das Endprodukt Uranblei nicht mehr zerfällt, nimmt seine Menge mit zunehmendem Alter des Minerals immer mehr zu.

Abb. 19

Das radioaktive oder Zerfallsgleichgewicht (vereinfacht und stark schematisiert)

Die Zwischenprodukte mit gleichem Atomgewicht sind zwecks Vereinfachung der Darstellung jeweils in einer einzigen Schale zusammengefaßt. Bei jedem Alphaerfall (Abspaltung von Helium) sinkt das Atomgewicht um 4 Einheiten ab.

Welcher Rohstoff für Atomkernenergie?

Es ergibt sich also die mißliche Tatsache, daß gerade von den spontan schnell zerfallenden Radioelementen wenig vorhanden ist. Die verhältnismäßig starke Wärmeentwicklung des Radiums pro Gramm und Tag — wie auch die anderer, noch weniger stabiler Radioelemente — bringt uns daher keinen Nutzen: Je aktiver diese Stoffe sind, desto weniger ist von ihnen vorhanden. Tatsächlich sind unter den Radioelementen nur *Uran 235* und *238* sowie *Thorium* genügend stabil, um überhaupt in nennenswerter Menge auf der Erde vorhanden zu sein (Halbwertszeiten: 0·7 bzw. 4·5 und 14 Milliarden Jahre).

Es war das Verdienst des hervorragenden Radiochemikers *Frederick Soddy*, das Problem der *Nutzbarmachung der Atomkernenergie von verhältnismäßig stabilen, also langlebigen Radioelementen* erkannt zu haben. *Soddy* schrieb 1909: „Es wäre gewagt, die Wirkungen vorauszusagen, welche diese Entdeckungen (der Radioaktivität, E. B.), die in erster Linie die Natur der Materie betreffen, auf unsere Vorstellungen von dem letzten Schicksal des Menschen auszuüben bestimmt sind. Aber ein unmittelbarer Zusammenhang ist bereits erkennbar, und dieser ist vielleicht das Revolutionärste in der ganzen Entwicklung... Durch die Erkenntnis, daß in der gewöhnlichen Materie große Energievorräte aufgespeichert sind, die wir nur aus Unkenntnis einstweilen nicht für die Zwecke des Lebens nutzbar machen können, hat die Radioaktivität einen Erfolg erzielt, der sicherlich eine Epoche im Fortschritt des Denkens bezeichnen wird. Bei all unserer Beherrschung der Naturkräfte haben wir immer an der Ansicht festgehalten, daß der Kampf ums Dasein eine dauernde und notwendige Lebensbedingung ist. Heute hat es den Anschein, als ob er nur eine vorübergehende Phase sei, die in der Zukunft ganz verschwinden wird. In streng wissenschaftlichem Sinn ist kein wesentlicher Unterschied zwischen der Radioaktivität des Urans und derjenigen des Radiums. Sie sind dem Grade nach voneinander verschieden, aber dieser Unterschied ist so groß, daß sich die allgemeine Aufmerksamkeit fast ausschließlich auf das Radium richtete, obgleich es in Wirklichkeit nicht so wunderbar ist wie das Uran...“

Die Energie in einer Tonne Uran würde hinreichen, London ein Jahr lang zu beleuchten. Es gibt viel Energie in der Welt, die praktisch wertlos ist. Die Energie der Gezeiten sowie die Abwärme des Dampfes fallen in diese Kategorie der nutzlosen Energie. Aber die innere Energie des Urans ist nicht von dieser Art. Die Schwierigkeit ist von einem ganz anderen Charakter. Wir können die Geschwindigkeit des Zerfalls eines Elements nicht beschleunigen oder beeinflussen, und daher ist die Energie im Uran, die zu ihrer Entwicklung tausend Millionen Jahre braucht, praktisch wertlos. Die natürliche Geschwindigkeit zu erhöhen und das Uran oder ein anderes Element künstlich zu zerstören, ist einfach Transmutation. Könnten wir das eine, so könnten wir auch das andere. Diese beiden Probleme, das älteste und das neueste, sind eins. Die Transmutation der Elemente ermöglicht es, die innere Energie der Elemente zu erschließen... Wenn wir auf große Dinge zurückblicken, welche die Wissenschaft bereits vollbracht hat, sowie auf das stetige Wachsen der Macht und Fruchtbarkeit der wissenschaftlichen Methode, so kann es kaum bezweifelt werden, daß es uns eines Tages möglich sein werde, im Laboratorium Elemente zu zerlegen und aufzubauen. Die Pulse der Welt werden dann mit neuer Kraft schlagen.“ Dies schrieb *Soddy* zehn Jahre vor der ersten künstlichen Kernreaktion (Transmutation).

Die Gedanken *Soddys* wurden bald von dem bedeutenden sozialkritischen Schriftsteller *H. G. Wells*, der naturwissenschaftlich geschult war, aufgenommen. In seinem wenig bekannten utopischen Roman „Die Welt entfesselt“ (*“The World Set Free”*), der kurz vor dem Ersten Weltkrieg erschien und *Soddy* gewidmet ist, beschrieb *Wells* die Erschließung der im Uran schlummernden Energie. Sie sollte durch Methoden erfolgen, die um das Jahr 1933 entwickelt werden würden. Eine *Nutzbarmachung* zur Energieerzeugung sollte um das Jahr 1953 gelingen. Einige Jahre später sollten die ersten *Atombomben* (so heißen sie bei *Wells*) von französischen und deutschen Fliegern mit katastrophalen Wirkungen über Berlin bzw. Paris abgeworfen werden. (Daß die Atombombe *vor* der Nutzbarmachung der Atomenergie verwendet werden würde, hat *Wells* allerdings nicht vorausgesehen!) Die realistischen Phantasien *Wells'* sind nicht ohne Wirkung geblieben. Einige der Forscher, die sich zu Ende

der dreißiger Jahre, als die Zeit reif war, dem Problem der Atomenergie zuwenden konnten, waren in ihrer Jugend durch *Wells'* Roman inspiriert worden. Es ist nur schade, daß die sozialen Ideen *H. G. Wells'* weniger tief gingen als seine wissenschaftlichen Ideen. Nach *Wells* sollte die Menschheit von der Drohung der Atombombe und überhaupt von den Übeln des Krieges und der Zersplitterung in feindliche Staatswesen dadurch befreit werden, daß die Könige der Welt auf einer Bergwiese im schönen Schweizer Kanton Tessin großherzig beschließen, ihre Herrschaft zurückzulegen und eine sozialistische Weltrepublik zu gründen.

Die Entdeckung der künstlichen Kernumwandlung durch *Rutherford* und ihre Entwicklung durch *Cockcroft* und *Walton* haben theoretisch einen enormen Fortschritt bedeutet (siehe Seite 76). Damit wurde aber die Nutzbarmachung der Atomenergie, wenn sie auch nähergebracht wurde, noch nicht unmittelbar ermöglicht. Die *Ausbeute* bei Kernreaktionen, die mit elektrisch geladenen Geschossen erzwungen werden, ist nämlich sehr klein. *Cockcroft* mußte Hunderttausende von Geschossen (Ionen) aufwenden, um einen einzigen *Kern* zur Reaktion zu bringen. Die anderen Geschosse verloren ihre Energie nutzlos in Zusammenstößen mit *Atomhüllen* der Zielscheibe (des beschossenen Elements), bevor sie noch einen Kern trafen. Es kann also zwar in dieser Reaktion eines Einzelkerns viel Energie frei werden, aber diese Energie kann doch bei weitem nicht die gewaltige Energie ersetzen, die notwendig ist, um Hunderttausende von Geschossen mit hunderttausenden Volt zu beschleunigen. Eine praktisch brauchbare Möglichkeit zur Entbindung der Atomenergie wurde vielmehr erst im Anschluß an die Entdeckung der *Kernspaltung* des Urans gefunden, die auf Seite 99ff. besprochen werden soll.

Wir werden später auch sehen, daß sämtliche bisher errichtete oder auch nur projektierte — Atomenergieanlagen auf der fort-dauernden Existenz des Uran 235 in der Erdkruste beruhen. Uran 238 und Thorium können nur mit Hilfe des Uran 235 nutzbar gemacht werden. Es ist in gewissem Sinne ein Zufall, daß das Uran 235 so langsam zerfällt, daß der Mensch noch eine hinreichende Menge „erlebt“.

Die Größe der Atomenergie

Vergleich mit chemischen Reaktionen

Bei verschiedenen *Kernreaktionen* werden, ebenso wie bei verschiedenen chemischen Reaktionen, verschiedene Energiemengen frei. In *Tabelle VI* sind einige wichtige Kernreaktionen zusammengestellt. Die Tabelle gibt natürlich nicht die Wärmetönungen je Zeiteinheit an, sondern die gesamten Wärmetönungen, die erhalten werden, wenn die Reaktion wirklich bis zum Ende abläuft (theoretische Maximalwerte).

Tabelle VI

Wärmetönungen von Atomkern- und chemischen Reaktionen

Art der Reaktion	Wärmetönung (große Kalorien pro kg Ausgangsstoff)	
Alphazerfall des Urans (s. Seiten 57, 88) ..	400.000.000	} Kern- reaktionen
Alphazerfall des Radiums	460.000.000	
Betazerfall des Tritiums ${}^3_1\text{H}$ (s. Seite 80) .	45.000.000	
Betazerfall des Radiophosphors ${}^{32}_{15}\text{P}$	400.000.000	
Betazerfall des Radiokobalts ${}^{60}_{27}\text{Co}$ (s. S. 80)	40.000.000	
Einfang von Neutronen durch Protonen .	25.000.000.000	
Kernspaltung des Urans mit Folge- reaktionen (s. Seite 99)	19.000.000.000	
Aufbau von Helium aus Wasserstoff.....	170.000.000.000	} Chemische Reaktionen (zum Vergleich)
Verbrennung von Steinkohle (s. Seite 87)	8.000	
Detonation von Dynamit	1.300	

Das Entscheidende für die Nutzbarmachung ist es aber zunächst nicht, eine besonders energiereiche Kernreaktion auszuwählen. Vielmehr handelt es sich darum, überhaupt einmal eine Kernreaktion zu finden, deren Rohstoff in hinreichender Menge vorhanden ist und die doch irgendwie auf eine genügende Geschwindigkeit ge-

bracht werden kann. Nach den Überlegungen von Seite 90 können (wenn wir uns zunächst auf die radioaktiven, also ersichtlich instabilen Elemente beschränken) nur *Uran* oder *Thorium* als Rohstoff dienen.

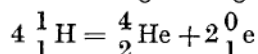
Vergleichen wir nun die durch eine Kernreaktion erhältliche Energie mit dem Energiebedarf der Welt. Wir wollen dabei die *Kernspaltung* zur Grundlage nehmen, obwohl sie erst später besprochen werden soll; tatsächlich läßt sich ja bisher nur die Kernspaltung praktisch verwerten. Der Weltkohlebedarf beträgt etwa 1700 Millionen Tonnen im Jahr. Da nun nach *Tabelle VI* ein Kilogramm Uran bei Spaltung etwa zweieinhalbmillionenmal mehr Wärme liefert als ein Kilogramm Steinkohle bei Verbrennung, könnten 700 Tonnen Uran die in der Welt verbrauchte Kohle ersetzen. Dabei wollen wir hier für unsere ganz ungefähre Schätzung davon absehen, daß ein (kleinerer) Teil der Kohle anderen als reinen Wärmezwecken dient, z. B. zur Herstellung von Hochofenkoks verwendet wird.

Ein anderer Vergleich: Der jährliche Stromverbrauch der Welt ist von der Größenordnung 1400 Milliarden Kilowattstunden (kWh). In einem modernsten Kraftwerk werden zur Erzeugung einer Kilowattstunde 2500 Kalorien verbraucht. Der Stromverbrauch der Welt kann daher durch Spaltung von zirka 200 Tonnen Uran jährlich gedeckt werden. Da die Dichte des metallischen Urans, bezogen auf Wasser, etwa 19 beträgt, stellt die genannte Uranmenge einen Würfel von bloß 2·2 Meter Kantenlänge dar.

In diesem Zusammenhang kann man auch Vergleiche mit Sprengstoffen ziehen. Die Wirkung von Sprengstoffen beruht darauf, daß in einem kleinen Volumen innerhalb sehr kurzer Zeit eine große Menge heißer Gase entsteht, die daher unter hohem Druck stehen. Ein Blick auf *Tabelle VI* zeigt, daß beim explosiven Zerfall eines Kilogramms Uran fünfzehnmillionenmal mehr Wärme entsteht als bei der Detonation von einem Kilogramm Dynamit. Nun sind zwar die Sprengwirkungen — die überhaupt nicht leicht eindeutig zahlenmäßig zu fassen sind — nicht einfach durch die Wärmeentwicklung bestimmt, sondern hängen von mehreren Faktoren ab. Immerhin erkennen wir die überlegene Wirksamkeit von Atomspengstoff.

Die Energiequelle der Sonne

Die in *Tabelle VI* an drittletzter Stelle angeführte Reaktion ist die „Kondensation“ des gewöhnlichen Wasserstoffs zu Helium nach der rein schematischen Reaktionsgleichung:



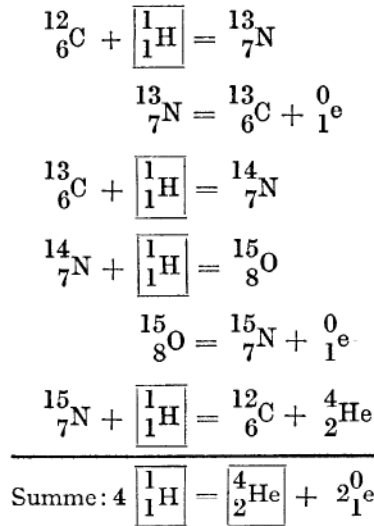
Es handelt sich dabei *nicht um einen Abbau* von Atomkernen wie bei dem spontanen Alphazerfall oder bei der Kernspaltung des Urans, sondern um einen *Aufbau (Synthese)* eines schwereren Kerns aus mehreren leichteren Kernen. In diesem konkreten Fall ist die *Aufbaureaktion* energieliefernd — und zwar pro Masseneinheit viele Male stärker als die *Uranspaltung*.

Diese Reaktion bildet nach den Rechnungen des Physikers *Bethe* die Energiequelle der *Sonne* und überhaupt der meisten *Fixsterne*. Der reichliche Wasserstoff dieser Sterne verwandelt sich also im Laufe der Jahrmilliarden allmählich in Helium, und die Reaktionsenergie wird in den Weltraum ausgestrahlt.

Solche Aufbaureaktionen können nur bei sehr hoher Temperatur erfolgen, insbesondere eben im Inneren der Fixsterne. So schreibt man dem Sonneninneren eine Temperatur von 20 Millionen Grad zu. Die Atomkerne sind natürlich sämtlich positiv geladen. Sie stoßen einander daher ab. Wenn sie dennoch miteinander reagieren sollen, müssen sie sich so schnell gegeneinander bewegen, daß sie durch den Bereich der *elektrischen Abstoßung* durchdringen und in den viel kleineren Bereich eindringen, in dem die *anziehenden Kernkräfte* wirksam werden. Diese Geschwindigkeit besitzen die Kerne nur bei sehr hoher Temperatur. Daher werden die energieliefernden Aufbaureaktionen auch als *thermonukleare* Reaktionen bezeichnet — nukleare (Kern-) Reaktionen, die durch Wärme (thermisch) ermöglicht werden.

Allerdings kann die Reaktion in der schematischen Form, in der wir sie angeschrieben haben, nicht einmal bei der Temperatur des Sonneninneren hinreichend schnell erfolgen, um den Energiebedarf der Sonne zu decken. Es müßten ja *vier* Protonen — die alle positiv geladen sind — *gleichzeitig* mit genügender Geschwindigkeit aufeinander-treffen, was offenbar nur ganz besonders selten geschehen kann.

Deshalb nimmt *Bethe* an, daß die Reaktion auf einem Umweg erfolgt, nämlich durch eine Reaktionskette, bei der Kohlenstoff als *Katalysator* dient. Der Kohlenstoff wird also letzten Endes (wie dies dem Begriff des Katalysators — Reaktionsbeschleunigers — entspricht) bei der Reaktion nicht verbraucht, sondern wird immer wieder regeneriert. Die Reaktionskette lautet:



Die Berechnungen haben ergeben, daß die Geschwindigkeit dieses Reaktionszyklus so groß ist, daß man auf diese Weise die Leistung der Sonne erklären kann.

Auf der Erde sind thermonukleare Reaktionen bisher nur durch die *Wasserstoffbombe* verwirklicht worden. Von dieser wird später noch die Rede sein. Es sei aber schon hier unterstrichen, daß die Menschheit, wenn ihr einmal die *Beherrschung* der thermonuklearen Reaktionen gelingen wird, durch den Wasserstoff der Weltmeere über eine unerschöpfliche Energiequelle verfügen wird.

Die Kernspaltung des Urans

Die Kernspaltung als neuartige Kernreaktion

Auf Seite 93 sind wir zu dem Ergebnis gelangt, daß es darauf ankommt, den Zerfall des Urans (oder des Thoriums) zu beschleunigen. Eine Möglichkeit dazu hat sich 1938 mit der Entdeckung der *Urankernspaltung* durch *Otto Hahn* und *Fritz Straßmann* geboten. Diese Entdeckung wurde im Verlaufe gewisser radiochemischer Forschungen gemacht, nicht aber etwa im Zuge eines planmäßigen Angriffs auf das Problem der Atomenergie. In diesem Sinne muß also die Entdeckung als *zufällig* betrachtet werden. Die Tatsache, daß eine so wichtige Entdeckung als Ergebnis ganz anders gerichteter Forschungen gemacht werden konnte, beweist noch einmal, daß es der menschlichen Gesellschaft nicht einmal vom Standpunkt des rein praktischen Erfolges aus genügen kann, nur *angewandte Forschung* mit ganz bestimmter Zielsetzung zu betreiben. Vielmehr können Forschungen, die ganz „unpraktisch“ erscheinen, jederzeit in überraschender Weise eminente praktische Bedeutung gewinnen. Wer hätte 1896 vermuten können, daß als erster Schritt zur Erschließung einer völlig neuen und überwältigend mächtigen Energiequelle ein Stückchen Uransalz auf eine Photoplatte gelegt werden muß? Dieses Problem des Verhältnisses von Grundlagen- und angewandter Forschung ist auch schon anlässlich der Altersbestimmung nach der Kohlenstoffmethode gestreift worden (Seite 83).

Hahn und *Straßmann* fanden, daß das Uran einer ganz neuartigen, bis dahin nicht bekannt gewesenen Kernreaktion, nämlich der *Spaltung*, unterliegt, wenn man es mit Neutronen beschießt. Niemand hatte eine Kernreaktion dieses Typus je vorhergesehen. Erst die

experimentellen Tatsachen zwangen *Hahn* und *Straßmann* — gegen ihr anfängliches Widerstreben — zu der Annahme, daß eine solche neuartige Kernreaktion stattfindet. Diese Reaktion besteht darin, daß der Urankern in zwei nahezu gleich große Trümmer gespalten wird. Alle früher bekannten Kernreaktionen hatten nur in der Emission eines Teilchens oder weniger Teilchen bestanden, z. B. eines Pakets aus zwei Protonen und zwei Neutronen (Alphateilchen); die Masse des Kerns war also durch den Verlust des Alphateilchens nur um einen kleinen Bruchteil (im Falle des Urans um 1·7%) verringert worden. Man kann ermessen, welche Überraschung es demnach hervorrief, daß das Uran bei Beschuß mit Neutronen *mitten entzweibrechen* sollte. Man kann nicht einmal mehr sagen, welches der beiden Bruchstücke emittiert wird und welches hinterbleibt, denn beide Bruchstücke fliegen von dem Ort des ehemaligen Urankerns in entgegengesetzter Richtung auseinander.

Die physikalische Begründung für die Kernspaltung des Urans ist etwa die folgende: Die Nukleonen werden durch starke Bindungskräfte (Kohäsionskräfte) zusammengehalten. Diese Kräfte sind dem Atomkern eigentümlich und werden als *spezifische Kernkräfte* bezeichnet. Sie sind nicht elektrischen Ursprungs. Sie sind auch in ganz grober Annäherung meist nicht allzusehr davon abhängig, wieviel Nukleonen sich bereits im Kern befinden. Vielmehr leistet jedes einzelne Teilchen beim (gedanklich durchgeführten) systematischen Aufbau eines Kernes aus einzelnen Nukleonen einen ungefähr gleich großen Beitrag zur gesamten Bindungsenergie. Zum Beispiel hängt die Anlagerungsenergie, die beim Einfang eines Neutrons frei wird, im allgemeinen von der Massenzahl der Kerne nur wenig ab. Dies ist aber nur *eine* Seite der Sache. Andererseits muß man nämlich noch die elektrische Ladung der Protonen berücksichtigen, kraft derer sie einander abstoßen. Daher wird der *allgemeinen Anziehung* der Nukleonen, von der Protonen und Neutronen annähernd gleichmäßig erfaßt werden, eine *elektrische Abstoßungskraft* entgegenwirken, soweit es sich um die Bindung von Protonen allein handelt; bei der Bindung von Neutronen wird allerdings keine Abstoßungskraft wirksam werden, da diese Nukleonen ja elektrisch ungeladen sind. In den höchstgeladenen Kernen wird sich daher eine Tendenz zeigen,

einen weiteren Anstieg der Kernladung zu vermeiden. Diese Tendenz kann sich bis zu einem gewissen Grade durch eine Bevorzugung von Neutronen in den Atomkernen auswirken. Die resultierende Bindungsenergie der Neutronen übertrifft also die der Protonen.

Tatsächlich ist bekannt, daß stabile Kerne ein Neutronen-Protonen-Verhältnis haben, das mit steigender Kernladungszahl zunimmt. In *Tabelle VII* sind für einige Kernladungszahlen jene Neutronenzahlen angegeben, die Kerne größtmöglicher Stabilität ergeben. Dabei wird angenommen, daß das häufigste in der Natur vorkommende Isotop jedes Elements auch dessen stabilstes Isotop ist (siehe S. 55).

Tabelle VII

Verhältnis von Protonen und Neutronen in Atomkernen

Element	Anzahl der Protonen	Anzahl der Neutronen	Massenzahl	Verhältnis der Neutronen- zur Protonenanzahl
		des häufigsten Isotops		
Helium	2	2	4	1 : 1
Sauerstoff	8	8	16	1 : 1
Eisen	26	30	56	1'15 : 1
Jod	53	74	127	1'40 : 1
Uran	92	146	238	1'59 : 1

Allein, die Möglichkeit, durch Erhöhung des Neutronen-Protonen-Verhältnisses die Abstoßungskraft „unschädlich zu machen“, ist begrenzt. Mehr als eine ganz bestimmte Menge Neutronen-„Kitt“ können die Kerne offenbar nicht aufnehmen. Deshalb setzt sich bei den höchstgeladenen Kernen schließlich die Neigung durch, die positiven Ladungen auszustoßen. Dies geschieht, indem Alphateilchen emittiert werden. *Alphazerfall* ist eine Erscheinung, die bei allen Elementen höchster Kernladungszahl, nämlich bei den Elementen der Kernladungszahl 83 oder mehr, bekannt ist. Gelegentlich kommt er auch bei Atomarten geringerer Kernladung vor. Die Emission jedes Alphateilchens (Heliumkerns) setzt die Kernladung um 2 Einheiten herab.

Die energetische Basis der *Kernspaltung* ist mit der des Alpha-zerfalls eng verwandt. Auch die Kernspaltung ist für den Kern ein „Mittel“, die übermäßige Ladung zu verringern. Die Kernspaltung, bei der der Kern überhaupt entzweibricht, ist allerdings ein sehr viel drastischeres Mittel als der Alpha-zerfall. Der *Mechanismus der Spaltung* ist etwa der folgende: Nach dem *Tröpfchenmodell des Atomkerns* (Seite 50) sind die Nukleonen in ungeordneter Bewegung begriffen. Im Mittel wird der Atomkern Kugelgestalt besitzen. Die Gestalt wird aber durch die Nukleonenbewegung gewissen „zufälligen“ Schwankungen unterworfen sein. Gelegentlich wird sich infolge der ungeordneten Bewegung der Teilchen eine Abweichung von der Kugelgestalt ergeben. Es kann zur Ausbildung einer etwa ei- oder pflaumenförmigen Gestalt, ja sogar zur Entstehung einer Taille kommen. Im allgemeinen werden allerdings die Anziehungskräfte im Kern, die doch im großen überwiegen müssen — sonst wäre der Kern gar nicht existenzfähig —, eine Rückkehr zur Kugelgestalt erzwingen. Die Kugelgestalt ist ja die Gestalt, in der die mittleren Entfernungen der Teilchen voneinander am kleinsten sind, die also die gegenseitige Anziehung am besten befriedigt. Ebenso kehrt ein freischwebender Flüssigkeitstropfen, der vorübergehend gequetscht oder schwach eingeschnürt wird, von selbst in die Kugelgestalt zurück. Diese Rückkehr wird im Falle der Flüssigkeit durch die Oberflächenspannung bewirkt — die Kraft, die einem Flüssigkeitskörper die kleinste Oberfläche zu verleihen strebt.

Allerdings findet die Rückkehr des Atomkerns zur Kugelgestalt nur *im allgemeinen* statt. Bisher haben wir nämlich einen wichtigen Umstand außer acht gelassen: die Abhängigkeit der dem Kern eigentümlichen *Kohäsionskräfte* einerseits und der *elektrischen Abstoßungskräfte* andererseits von der Entfernung zwischen den Nukleonen ist nicht die gleiche. Man weiß vielmehr, daß die Kohäsionskräfte mit zunehmendem Abstand schneller als die abstoßenden elektrischen Kräfte abnehmen (siehe Seite 79). Daher kann die Ausbildung einer Eigestalt zu einer Katastrophe des Kerns führen (*Abb. 20*). Durch die Vergrößerung des mittleren Abstandes der Teilchen voneinander werden ja die schneller abnehmenden Anziehungskräfte zugunsten der Abstoßungskräfte benachteiligt. Wenn

also die Verzerrung der Kugelgestalt ein gewisses *kritisches* Ausmaß überschreitet, gewinnen die Abstoßungskräfte die Oberhand. Die Anziehung kann dann keine Rückkehr zur Kugelgestalt mehr bewirken. Auch die Oberflächenspannung im Flüssigkeitstropfen kann die Kugelgestalt nicht mehr herstellen, wenn die Einschnürung ein

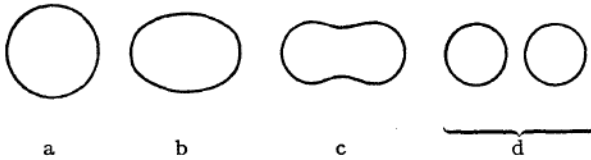


Abb. 20

Gestaltveränderung und Spaltung eines Atomkerns von hoher Kernladung

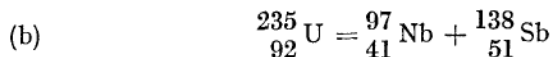
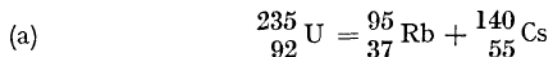
- a ... Atomkern in idealer Kugelform;
- b ... Verzerrung zur Eiform;
- c ... die Verzerrung erreicht das kritische Ausmaß;
- d ... Tochterkerne nach der Zerreißung.

gewisses kritisches Ausmaß überschritten hat. Vielmehr erfolgt dann Teilung des Tropfens. Ganz analog trennen sich die beiden Bruchstücke des Kerns nach kritischer Verzerrung. Allerdings müssen beim Atomkern, im Gegensatz zum Tropfen, die beiden Stücke mit großer Gewalt auseinanderfliegen. Nach vollzogener Spaltung, nachdem also der Wirkungsbereich der Anziehung verlassen worden ist, kommen nämlich nur mehr die elektrischen Abstoßungskräfte zwischen den beiden hoch positiv geladenen Tochterkernen voll zur Geltung. Das ist der Mechanismus der Kernspaltung; wir haben ihn der Deutlichkeit halber stark vereinfacht dargestellt.

Praktisch darf man freilich hinreichend starke *spontane* Gestaltsänderungen (Verzerrungen) nur bei solchen Kernen erwarten, die schon von vornherein durch ihre hohe Ladung stark beansprucht sind. Bei ihnen wird die kritische Verzerrung relativ leicht erreicht. Das Uran hat unter allen natürlichen Elementen die höchste Ladungszahl. Als erste haben die jungen Forscher *Flerow* und *Petržak* 1940 in Moskau die *spontane Kernspaltung* am Uran nachgewiesen. Doch ist eine solche spontane Uranspaltung, wenn sie auch theoretisch äußerst

wichtig ist, ein sehr seltener Vorgang. Übrigens mußten *Flerow* und *Petržak* ihre Versuche in den tief unter dem Erdboden verlaufenden Tunnels der Moskauer Untergrundbahn durchführen. An der Erdoberfläche gibt es nämlich stets eine gewisse Anzahl von Neutronen, die durch die kosmische Höhenstrahlung erzeugt werden und natürlich auch im Uran Kernspaltung hervorrufen können (siehe S. 81). Außer am *Uran* wurde spontane Spaltung bisher nur am *Thorium* und an den künstlich erzeugten *Transuranen* (Seite 130) beobachtet. Bei einigen der letzteren erfolgt die spontane Spaltung sogar mit kleinerer Halbwertszeit als ihr Alphazerfall.

Die Kernspaltung kann in verschiedenster Weise erfolgen, denn der Ort des Bruchs ist ja nicht genau bestimmt. Alternative Möglichkeiten der Uranspaltung unter Bildung von Isotopen der Elemente Rubidium, Caesium, Niobium und Antimon sind z. B.:



Bisher kennt man mindestens fünfzig verschiedene Arten der Spaltung.

Die Kernspaltung durch Neutronen

Welche Rolle spielt nun das *Neutron* bei der Kernspaltung? Beim Einfang (bei der Anlagerung) des Neutrons wird den Nukleonen des Kerns Energie zugeführt. Die Bindungsenergie des Neutrons, die beim Einfang frei wird, setzt sich nämlich in zusätzliche Bewegungsenergie der Nukleonen um. Man kann sich das so vorstellen, daß das Neutron, wenn es vom Kern angezogen wird, dabei ebenso wie ein fallender Stein, der von der Erde angezogen wird, Bewegungsenergie erwirbt. Im Augenblick des Aufpralls auf die „Kernflüssigkeit“ wird diese Energie auf die Nukleonen übertragen — so wie wenn der Stein in einen Teich fällt und Wellen schlägt. Die Nukleonen geraten also in übernormal heftige Bewegung; man kann sagen, daß die

„Temperatur des Kerns“ gestiegen ist. Wenn aber die Bewegung der Nukleonen heftiger ist, wird es leichter vorkommen, daß der Kern zufällig bis über den kritischen Punkt verzerrt wird. Die Wahrscheinlichkeit der Kernspaltung wird also durch den vorhergehenden Einfang des Neutrons gesteigert. Wie das Experiment zeigt, wird sie sogar in einem gewaltigen Ausmaß gesteigert.

Wie leicht die kritische Verzerrung eines bestimmten Atomkerns und Spaltung erreicht werden kann, hängt von seiner genauen Zusammensetzung ab. Die drei im Hinblick auf ihre natürliche Häufigkeit in Betracht kommenden Atomkerne sind die zwei Isotope, aus denen das natürliche Uran hauptsächlich besteht, nämlich ${}_{92}^{235}\text{U}$ und ${}_{92}^{238}\text{U}$ sowie das Thorium ${}_{90}^{232}\text{Th}$. Es zeigt sich, daß die Bindungsenergie eines Neutrons nur beim ${}_{92}^{235}\text{U}$ (Aktinuran) zur Spaltung ausreicht. Beim ${}_{92}^{238}\text{U}$, dessen Nukleonen ja stärker verkittet sind und dessen Atomkern daher stabiler ist, müssen die einfallenden Neutronen als „Mitgift“ außer ihrer *Bindungsenergie* auch noch *Bewegungsenergie* mitbringen, und zwar müssen sie mit einer Geschwindigkeit von mindestens 15000 km/Sekunde in den Kern eindringen. Ähnliches gilt auch für das Thorium, dessen Kern ja eine kleinere Ladung besitzt. Neuerdings ist es auch gelungen, in Elementen noch kleinerer Ladungszahl, z. B. in Wismut (83), in Blei (82) und sogar in Tantal (73), Kernspaltung zu erzwingen. Die verwendeten Geschosse müssen aber eine ganz besonders hohe Energie mitbringen. Daher ist eine praktische Ausnützung der Spaltbarkeit dieser Kerne bisher noch nicht einmal vorgeschlagen worden.

Die Wärmetönung der Kernspaltung

Die Entdeckung *Hahns* und *Straßmanns* (siehe Seite 99) erregte, als sie am 15. Jänner 1939 im Druck erschien, sogleich das gebührende Aufsehen. Ein Grund dafür war, daß hier eine Kernreaktion eines neuen Typus vorlag. Aber darüber hinaus ahnten die Physiker auch,

daß die Entdeckung große praktische Konsequenzen haben konnte. Zunächst einmal war theoretisch zu erwarten, daß die neue Kernreaktion, also die Atomkernspaltung, von einer weit größeren Wärmetönung begleitet sein mußte als die bis dahin bekannten Kernreaktionen. Ganz grob gesehen, kann man das insofern begreifen, als doch offensichtlich bei der *Kernspaltung* des Urans ein viel tiefer gehender Eingriff in das Gefüge des Kerns erfolgt als etwa bei der *Abtrennung* eines Alphateilchens. Bei der Kernspaltung wird die Kernladung in weitaus radikalerer Weise herabgesetzt. Diese Konsequenz wurde theoretisch zuerst von zwei Forschern gezogen, die von den Nationalsozialisten aus Deutschland vertrieben worden waren, nämlich von *Lise Meitner* in Stockholm und ihrem Neffen *Otto Frisch* in Kopenhagen. *Frisch* wies die Wärmetönung bei der Spaltung des Urankerns experimentell nach und fand, daß sie die Wärmetönung beim Alphazerfall des Urankerns noch um etwa das Vierzigfache übertrifft (*Tabelle VI*, S. 95).

Gelegentlich wird die Wärmetönung bei der Kernspaltung darauf „zurückgeführt“, daß bei ihr ein Massenverlust auftrete. Tatsächlich ist nach *Einstein* jede Energieabgabe einer gewissen Massenabgabe gleichwertig. Man kann leicht den nach *Einstein* zu erwartenden *Massenverlust* nachweisen, der mit Kernreaktionen, natürlich auch mit der so überaus heftig verlaufenden Kernspaltung, verknüpft ist. Die verlorene Masse des Kerns findet sich als „Masse“ der abgegebenen Strahlung wieder. Es hat aber keinen Sinn, die Sache so darzustellen, als wäre der Massenverlust die „Ursache“ der Energieabgabe. Auch darf man sich diesen nicht so vorstellen, als ob bei der Spaltung irgendein Teilchen überhaupt verschwinden und sich in Energie auflösen würde. Die Zahl der Nukleonen ändert sich bei keiner Kernreaktion. Nur werden die Nukleonen (bei wärmeliefernden Reaktionen) im Durchschnitt etwas leichter. Ein entsprechender Massenverlust tritt natürlich auch bei jeder *chemischen* Reaktion ein, die unter Energieabgabe verläuft, z. B. bei der Verbrennung der Kohle; nur ist er so gering, daß er sich dem Nachweis entzieht. Jedenfalls wäre es auch hier ganz irreführend, von dem Massenverlust als der *Ursache* der Verbrennung zu sprechen.

Der Massenverlust bei der (gedachten) Bildung von Kernen aus

Wasserstoff ist eine wesentliche Ursache für die *Nichtganzzahligkeit der Atomgewichte* auch von Reinelementen, worauf auf Seite 53 hingewiesen wurde. Nukleonen haben eben je nach ihrem Bindungszustand ein (wenig) verschiedenes Gewicht.

Die Neutronenemission bei der Kernspaltung; der Gedanke der Kettenreaktion

Die nächste Konsequenz wurde — ebenfalls noch im ersten Sechstel des Jahres 1939 — von *Joliot* und seinen Mitarbeitern *Halban* und *Kowarski* in Paris gezogen. Die Pariser Forscher gingen davon aus, daß im Sinne der *Tabelle VII* (Seite 101) bei einer Spaltung des Urankerns in zwei annähernd gleich große, mittelschwere Trümmer in beiden Spaltstücken ein gewaltiger *Neutronenüberschuß* entstehen müsse. Das Neutronen-Protonen-Verhältnis ist ja bei mittelschweren Kernen viel kleiner als bei Uran. Zahlenmäßig sieht die Sache so aus: Der Kern des leichter spaltbaren Uranisotops (Masse 235) enthält außer 92 Protonen 143 Neutronen. Wenn das spaltende Neutron berücksichtigt wird, müssen nach der Spaltung insgesamt 144 Neutronen untergebracht werden. Streng symmetrische Spaltung führt daher zu zwei Kernen der Ladung 46 und der Masse 118 — also der Neutronenzahl 72. Das Element mit der Kernladung 46 ist das Palladium, ein seltenes, platinähnliches Metall. Die höchste Neutronenanzahl, die in einem stabilen Palladiumkern untergebracht werden kann, ist aber, wie den Physikern wohlbekannt war, nur 64. Was geschieht also mit den überschüssigen 16 Neutronen? Man konnte nun daran denken, daß sie sich durch eine Anzahl von *Betazerfällen* in Protonen (und Elektronen) umwandeln könnten. Tatsächlich sind die Spaltprodukte fast durchwegs betaaktiv und die Produkte dieses Betazerfalls sind meist selbst noch weiter betaaktiv. Andererseits aber war doch mit der Möglichkeit zu rechnen, daß unter diesen extremen Bedingungen Neutronen als solche emittiert („abgedampft“) werden könnten. Eine solche Reaktion war zwar vorher an keinem Kern beobachtet worden, aber man hatte ja auch

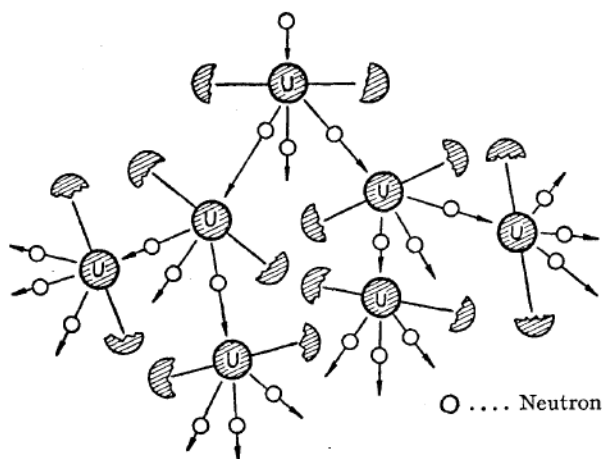


Abb. 21

Schematische Veranschaulichung einer Kettenreaktion von Kernspaltungen bei Uran 235

Angenommen, ein freies Neutron treffe auf einen Uran-235-Kern und spalte ihn in zwei annähernd gleich große Bruchstücke, wobei eine erste Tochtergeneration von durchschnittlich drei Neutronen freigesetzt werde. Während in dieser Darstellung durchschnittlich eins von diesen drei Neutronen für den Fortgang der Kettenreaktion verlorengeht, spalten zwei von ihnen wieder je einen U-235-Kern, deren jeder beim Zerfall in zwei Bruchstücke seinerseits abermals durchschnittlich drei Neutronen zweiter Tochtergeneration freisetzt. Das Spiel wiederholt sich in dritter, vierter, fünfter usw. Tochtergeneration von freigesetzten Neutronen – der Vorgang schwillt lawinenartig an, die Kettenreaktion nimmt im Bruchteil eines Augenblicks das Ausmaß einer furchtbaren Explosion an.

niemals zuvor Kerne mit derartigem Neutronenüberschuß kennengelernt.

Joliot gelang in kürzester Zeit der Nachweis, daß wirklich während der Kernspaltung Neutronen in ziemlich großer Anzahl emittiert werden. Damit aber eröffnete sich eine bedeutungsvolle Perspektive. Neutronen sind ja imstande, Kernspaltungen herbeizuführen: Joliot diskutierte also den Gedanken einer „Kettenreaktion“. Die freigemachten Neutronen könnten dazu dienen, die Reaktion fortzupflanzen, neue Kerne zu spalten, dadurch wieder neue Neutronen zu erzeugen usw. Die einzelnen Stufen einer solchen Reaktion würden wie die Glieder einer Kette aufeinanderfolgen. Freilich, wenn in der zweiten „Generation“ mehr Neutronen entstehen als

in der ersten, so würde die Reaktion immer heftiger werden. Sie würde sich, wie man auch sagt, nach Art einer Lawine ausbreiten und damit, wenn ihr nicht Einhalt geboten wird, schließlich explosionsartig verlaufen (*Abb. 21*).

Sich selbst fortpflanzende Kettenreaktionen sind in der gewöhnlichen Chemie natürlich wohlbekannt; bloß handelt es sich hier um Reaktionen der *Elektronenhüllen*. Auch eine gewöhnliche Verbrennung, z. B. von Leuchtgas, läßt sich insofern als eine Kettenreaktion auffassen, als die Verbrennung selbst die Wärme liefert, die zur Zündung weiteren Gases nötig ist. Die Kettenglieder werden hier von den molekularen Teilchen gebildet, die die zur Zündung erforderliche Energie weitertragen. Die Reaktionskette kommt in Gang, wenn einmal an einer Stelle reaktionsfähige Moleküle auftreten. (Chemische) Explosionen — z. B. des Dynamits — entstehen, wenn chemische Reaktionsketten sich besonders lebhaft fortpflanzen.

Die Entdeckung der Kernspaltung des Urans, die durch Neutronen ermöglicht wird und bei der wieder Neutronen entstehen, hat also zum erstenmal einen gangbaren Weg gezeigt, Atomenergie zu entfesseln — indem der Zerfall des Urans künstlich beschleunigt wird. Daß es sich bei der Kernspaltung des Urans nicht um eine mit dem einfachen Alphazerfall *identische* Reaktion, sondern um eine dem Alphazerfall nur *verwandte* Reaktion handelt, ist praktisch von beschränktem Interesse. Allerdings wird die Energielieferung, wie oben erwähnt wurde und wie auch ein Blick auf die *Tabelle VI* (Seite 95) zeigt, durch den *Übergang vom Alphazerfall zur Kernspaltung* um das Vierzigfache gesteigert. Die *Geschwindigkeit des Zerfalls* wird aber in einem sehr viel größeren Verhältnis erhöht. Die Steigerung der Wärmelieferung pro Zeiteinheit geht also vor allem auf die *Beschleunigung* der Reaktion zurück, obwohl natürlich die vergrößerte individuelle Reaktionsenergie auch willkommen ist. Während der spontane Alphazerfall des Urans etwa 0·00017 Kalorien pro Kilogramm und Tag erbringt, kann der neutronenbeschleunigte Zerfall in einem sogenannten Reaktor viele Millionen Kalorien pro Kilogramm und Tag und in der Atombombe sogar viele Milliarden Kalorien pro Kilogramm und Millionstelsekunde liefern. Diese Schätzungen seien hier ohne weiteren Beweis mitgeteilt.

Wenn das Uran den Neutronen in Form massiver Stücke ausgesetzt wird, wie dies in den meisten Reaktoren (siehe S. 119) der Fall ist, so wird der weitaus größte Teil der Wärme *innerhalb* der Stücke frei. Die Bruchstücke der gespaltenen Urankerne werden nämlich, ähnlich wie die Alphateilchen, von Materie sehr stark gebremst und haben daher nur eine geringe Reichweite. Bloß ein kleiner Teil der Energie wird in Form von durchdringender Strahlung abgegeben.

Der Begriff des Reproduktionsfaktors

Allerdings war mit dem Nachweis, daß *überhaupt* Neutronen emittiert werden, noch nicht bewiesen, daß ihre Anzahl für die Aufrechterhaltung einer Kettenreaktion ausreicht. Eine Vorbedingung hierfür ist natürlich, daß im Durchschnitt bei jeder Spaltung *mehr Neutronen als bloß eines* entstehen. Sonst ist ja wegen der zu berücksichtigenden Neutronenverluste von vornherein die Neutronenzahl in jeder „Generation“ kleiner als in der vorangegangenen Generation und die Kette stirbt alsbald ab; eine solche Kette wird als *konvergent* bezeichnet. Tatsächlich werden, wie experimentell gefunden wurde, durchschnittlich etwa 2,5 Neutronen pro Uran-spaltung freigesetzt. Die Grundforderung für die Aufrechterhaltung der Reaktionskette ist also erfüllt.

Die erwähnten Verluste ergeben sich daraus, daß Neutronen noch auf andere Weise als durch Einfang in Uran mit nachfolgender Spaltung „sterben“ können und daher nicht zur Wirkung kommen. Eine Dauerkette ist nur möglich, wenn für jedes Neutron der ersten Generation, das Spaltung hervorruft, mindestens ein Neutron der zweiten Generation gleichfalls Spaltung bewirkt. In diesem Falle sagt man, daß der mit dem Symbol k bezeichnete *Reproduktionsfaktor* (der Neutronen) bei der Kettenreaktion *gleich eins* oder *größer als eins* ist. Nur eine Kette, wo k *größer als eins* ist (eine *divergente* Kette), pflanzt sich fort.

Wie groß nun in der Praxis der Reproduktionsfaktor k ist, muß außer von der Neutronenemission pro Spaltung auch von der räum-

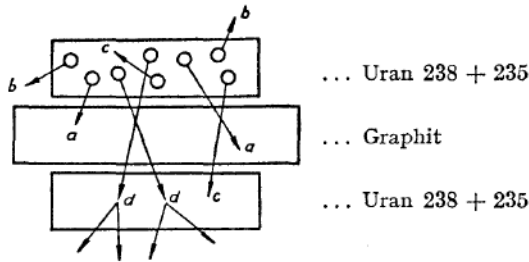


Abb. 22

Mögliche Schicksale der bei der Kernspaltung des Urans freigesetzten Neutronen im Reaktor:

Verlust der Neu- tronen	{	a ...	Einfang durch Graphit;
		b ...	Entweichen (Diffusion) durch die Grenzflächen nach außen;
		c ...	Einfang durch Uran 238 (Bildung von Plutonium);
		d ...	Einfang durch Uran 235 \longrightarrow Fortsetzung der Reaktionskette.

(Bisweilen werden Neutronen auch von Uran 235 eingefangen, ohne daß Spaltung eintritt.)

lichen Anordnung des Urans, von der Art und Menge sonstiger Baustoffe der Anlage, vom Reinheitsgrad der verwendeten Stoffe (einschließlich des Urans) usw. abhängen. Es ist beispielsweise klar, daß keine Kette sich entwickeln kann, wenn die Werkstoffe zu viele neutronenabsorbierende Verunreinigungen enthalten; in diesem Falle ist die *parasitäre Absorption* zu stark. Die Arbeiten der ersten Jahre nach 1939 waren daher einerseits auf die Herstellung reiner Werkstoffe und andererseits auf die Ermittlung der günstigsten Anordnung konzentriert, wobei man eben die verschiedenen „Schicksale“, die die freien Neutronen auf ihrem Weg erleiden können, in Rechnung stellen mußte (siehe *Abb. 22*).

Um eine günstige Anordnung zu finden, sind die verschiedenen Möglichkeiten in Betracht zu ziehen, unter denen überhaupt ein Neutron den Tod finden kann. Damit sind wir an einem Punkt angelangt, an dem wir die Einwirkung der Neutronen auf das Uran näher analysieren müssen. In diesem Unterabschnitt war bisher nur davon die Rede, daß Neutronen Spaltungen im Uran herbeiführen können. Wir müssen aber noch berücksichtigen, daß das natürliche Uran in Wirklichkeit kein einheitlicher Stoff ist, sondern

sich (im wesentlichen) aus zwei Isotopen zusammensetzt (siehe Seite 74). Die eine der beiden Uransorten enthält neben den 92 Protonen im Kern noch 143, die andere dagegen noch 146 Neutronen. Das schwerere Isotop U 238 ist 140mal häufiger als das leichtere U 235, unterliegt aber der Spaltung nicht so leicht wie dieses (siehe Seite 105). Es enthält nämlich im Kern drei zusätzliche Neutronen, die als Kitt wirken und die Wirkung der elektrischen Abstoßung der Protonen abschwächen.

Das Uran 238 kann nur mit Hilfe von energiereichen (*schnellen*) Neutronen gespalten werden, und auch dann nur mit relativ geringer Ausbeute; in vielen Fällen unterliegt der Uran-238-Kern, der mit einem Neutron reagiert hat, keiner Spaltung. Wenn *langsame* Neutronen auf Uran 238 einwirken, werden sie zwar eingefangen, der Kern wird dabei aber auf keinen Fall gespalten. Davon wird auf Seite 129 noch die Rede sein. Wir sehen, daß sowohl bei Verwendung schneller als auch bei Verwendung langsamer Neutronen eine Konkurrenz der beiden Isotope um die Neutronen stattfindet. In beiden Energiebereichen (nämlich bei Verwendung schneller wie auch bei Verwendung langsamer Neutronen) ist eine Reaktion des Neutrons mit dem Kern des Uran 238 für die Aufrechterhaltung der Reaktionskette ungünstig, eine Reaktion mit dem Kern des Uran 235 günstig. Das Verhältnis der Wahrscheinlichkeiten von Reaktionen der Neutronen mit U 235 und mit U 238 ist in den beiden Energiebereichen nicht gleich, sondern liegt für langsame Neutronen günstiger. Bei Verwendung *reinen natürlichen* Urans (in dem also das Isotopenverhältnis 1 : 140 ist) und *schneller* Neutronen läßt sich *unter keinen Umständen* eine Kettenreaktion aufrechterhalten, also kein Reproduktionsfaktor gleich 1 oder größer als 1 erzielen. Bei Verwendung natürlichen Urans müssen die Neutronen daher *unbedingt verlangsamt* werden.

Anlagen, in denen regelbare Kettenreaktionen mit Neutronen ablaufen, werden allgemein als *Reaktoren* bezeichnet. Gelegentlich werden im Deutschen auch die Ausdrücke *Uranmeiler* oder *Uranbrenner* verwendet. Im Englischen und im Französischen gebraucht man auch das Wort „pile“ (Haufen oder Säule), im Russischen das Wort „Katjól“ (Kessel).

Die Verlangsamung von Neutronen

Wie können Neutronen verlangsamt werden? Die elektrisch geladenen Alpha- und die Betateilchen verlieren, wenn sie Materie durchlaufen, rasch an Energie, indem sie kraft ihrer elektrischen Ladung mit den Elektronenhüllen der Atome in Wechselwirkung treten. Die Neutronen dagegen werden durch elektrische Kräfte nicht beeinflußt. Sie können nur Energie verlieren, wenn sie mit irgendwelchen Teilchen *direkt zusammenstoßen*. Nun lehrt die Mechanik, daß Zusammenstöße einen um so größeren Energieverlust bewirken, je ähnlicher die Massen des stoßenden und des gestoßenen Teilchens einander sind. Das ist auch eine Tatsache der Erfahrung des täglichen Lebens. Die Masse des gestoßenen Teilchens darf einerseits nicht zu groß sein: Wenn ein Gummiball gegen einen großen Gegenstand fliegt, z. B. eine Mauer, so verliert er fast gar keine Energie (Geschwindigkeit), sondern prallt einfach ab und fliegt mit der gleichen Geschwindigkeit rückwärts. Andererseits verliert aber auch ein Gummiball, der einen sehr kleinen Gegenstand trifft, z. B. ein Insekt, wenig Energie. Der größte Energieverlust muß also in der Mitte liegen. Ein bißchen Rechnen oder Experimentieren zeigt, daß die beste Bremsung erfolgt, wenn der Gummiball einen gleichgroßen Ball trifft.

So wird auch das Neutron bei Zusammenstößen mit Teilchen gleicher Masse am wirkungsvollsten gebremst. Diese Bedingung ist am ehesten bei Zusammenstößen mit leichten Atomkernen erfüllt, insbesondere mit den Kernen des gewöhnlichen Wasserstoffatoms. Diese Kerne bestehen ja nur aus einem Proton; die Masse des Protons ist aber der des Neutrons annähernd gleich. Neutronen werden also am besten gebremst, wenn man sie in wasserstoffhaltige Substanzen laufen läßt. Wasser und Paraffinwachs sind hiezu geeignet. Stoffe, die eine Verlangsamung von Neutronen bewirken, heißen *Moderatoren*; Wasserstoff ist also der beste Moderator. Andere gebräuchliche, wenn auch weniger wirksame Moderatoren sind schwerer Wasserstoff (Masse 2) und Kohlenstoff (Masse 12). Die Bremsung von Neutronen wurde 1935 durch die sehr berühmte römische Physikergruppe aufgefunden, der unter der Leitung *Fermis* unter anderen

Amaldi, Pontecorvo, Rasetti und *Segrè* angehörten — eine Gruppe, die sich später in alle Winde zerstreut hat.

Während die neugeborenen Neutronen Geschwindigkeiten bis zu 40.000 km pro Sekunde aufweisen, bewegen sich die soweit als möglich gebremsten Neutronen im Durchschnitt nur noch mit 2·2 km pro Sekunde. Diese Bewegungsenergie können sie nicht mehr verlieren, da sie der Energie der umgebenden Moleküle, z. B. der Luftmoleküle, entspricht, mit denen die Neutronen immer wieder zusammenstoßen.

Eine divergente Kette erfordert also außer dem (natürlichen) Uran noch einen Moderator. Wir nehmen damit notgedrungen in Kauf, daß auch der Moderator Neutronen verschluckt und unwirksam macht. Wir müssen nur dafür sorgen, daß er nicht *zu viele* Neutronen absorbiert, sonst geht der Vorteil der Verlangsamung wieder verloren. Aus diesem Grunde kann Wasserstoff, der sonst der wirksamste und billigste Moderator ist, in einem Reaktor nicht verwendet werden, wenn mit dem natürlichen Gemisch der Uranisotopen gearbeitet wird. Wasserstoff schluckt nämlich die langsamen Neutronen ziemlich gierig. Wasserstoff ist nur brauchbar, wenn man gleichzeitig das leicht spaltbare Isotop U 235 im Uran anreichert, was durch schwierige und kostspielige Verfahren gelingt (Seite 74).

Somit bleiben für die Bremsung vor allem schwerer Wasserstoff (verwendet als *schweres Wasser*) und Kohlenstoff (verwendet als *Graphit*) zur Wahl. Beide Stoffe absorbieren nicht leicht Neutronen. Der schwere Wasserstoff ist wegen seiner kleineren Masse dem Kohlenstoff als Moderator überlegen; er ist aber schwer zu gewinnen und teuer (siehe Seite 73). Man braucht für einen Reaktor immerhin mehrere Tonnen schweres Wasser. Vor dem Zweiten Weltkrieg wurde dieser Stoff nach Kubikzentimetern gemessen. Gegenwärtig werden alljährlich nach Isotopentrennungsvorgängen hunderte Tonnen erzeugt.

Graphit ist trotz der notwendigen extremen Reinheit, die am besten bei Material gewährleistet ist, das aus Petroleum oder Gas erzeugt ist, weit billiger. Andererseits wird wegen seiner geringen Wirksamkeit als Moderator viel mehr Graphit gebraucht, so daß der ganze Reaktor schwerfälliger wird und auch mehr Uran enthalten muß.

Erster Nachweis einer potentiell divergenten und einer divergenten Kette

Daß *überhaupt* eine Mischung von Uran mit irgendeinem Moderator einen Reproduktionsfaktor von eins oder mehr haben kann, wurde — soweit bekannt — zuerst von den Mitarbeitern *Joliot*s im Dezember 1940 in Cambridge nachgewiesen. Als Frankreich 1940 zusammenbrach, entsandte *Joliot* seine Mitarbeiter mit dem Gesamtbesitz Frankreichs an schwerem Wasser (180 Liter — mehr, als damals an irgendeiner anderen Stelle vorhanden war) in die Emigration, während er selbst im Lande blieb, um an der Organisation des nationalen Widerstandskampfes führend Anteil zu nehmen.

Es zeigte sich, daß eine geeignete Mischung von schwerem Wasser und Uranoxyd (Uranmetall stand nicht zur Verfügung) grundsätzlich die Kettenreaktion erhält. Wir sagen „eine geeignete Mischung“, denn: wenn zuwenig Moderator verwendet wird, werden die Neutronen nicht hinreichend gebremst; wenn zuviel Moderator vorhanden ist, werden zu viele Neutronen durch den Moderator verschluckt.

Das positive Resultat bedeutete allerdings nicht, daß tatsächlich schon eine Kettenreaktion in Gang kam. Wir haben bisher einen Faktor außer acht gelassen, der sehr wichtig ist: daß nämlich jedes System nur *endliche Größe* besitzt. Neutronen können, statt durch Einfang im Reaktor zu sterben, durch die Oberfläche des Reaktors hindurch in die Außenwelt abwandern und auf diese Weise für die Aufrechterhaltung der Kette verlorengehen. Der auf diese Weise verlorene Bruchteil wird für einen Reaktor von gegebener materieller Zusammensetzung um so größer sein, je kleiner der Reaktor ist, da die Neutronen in einem kleinen System keinen weiten Weg bis zur Oberfläche zurücklegen müssen. Natürlich ist Kugelform vom Standpunkt der Vermeidung dieses Verlustes am günstigsten, da eine Kugel der Körper mit kleinster Oberfläche ist, wenn das Volumen festgelegt ist.

Der Reproduktionsfaktor k wurde auf Seite 110 für eine Mischung von gegebener Zusammensetzung unter der stillschweigenden Voraussetzung definiert, daß das System sehr groß ist, daß also sehr wenige Neutronen durch Abwandern verlorengehen. Wenn

nun der Reproduktionsfaktor, berechnet für große Dimensionen, genau gleich eins ist, kann offenbar ein System von der gleichen Zusammensetzung, aber von minderer Größe, wegen der Verluste durch Abwandern keine Kette aufrechterhalten. So bezeichnet man den Reproduktionsfaktor einer gegebenen Mischung für ein System unendlicher Größe als k_{∞} (ausgesprochen: „k—unendlich“). Der tatsächliche Reproduktionsfaktor in dem System beschränkter Größe wird als k (ohne Index) bezeichnet. k_{∞} muß natürlich immer größer sein als k . Ist zwar k_{∞} größer als 1, k aber kleiner als 1, dann ist die Kette *nicht divergent*, sondern nur *potentiell divergent*.

Weiter: Für jeden Wert des Reproduktionsfaktors k_{∞} , der größer als 1 ist, gibt es eine Mindestgröße des Systems, unterhalb deren die Kette wegen des Abwanderns von zu vielen Neutronen abbricht. Bei dieser Mindestgröße wird also k genau gleich 1. Diese Mindestgröße wird als *kritische Größe* (*kritisches Volumen, kritische Masse*) bezeichnet. Die kritische Größe ist am kleinsten, wird also am leichtesten erreicht, wenn der Reaktor annähernd Kugelgestalt aufweist. Im Jahre 1940 besaß man noch nicht genug schweres Wasser, um die kritische Größe des Systems zu erreichen. Immerhin konnte man nachweisen, daß für jedes Neutron der ersten Generation, das nicht durch die Oberfläche abwandert, in der zweiten Generation mehr als ein Neutron entstand. Die Kette war also potentiell divergent; k_{∞} war größer als 1, wenn auch k noch kleiner als 1 war. Damit war nachgewiesen, daß die *Zusammensetzung der Mischung* zur Aufrechterhaltung einer Reaktionskette geeignet war.

Die erste tatsächlich divergente Kette lief, soweit bekannt, erst im Dezember 1942 in Chicago unter Leitung des inzwischen emigrierten Italieners *Fermi* an. Die kritische Größe wurde damit zum ersten Male überschritten. Als Moderator diente bei diesem System aber nicht schweres Wasser, sondern Graphit. Für einen (unendlich großen) aus Uranmetall und Graphit bestehenden Reaktor wird ein Reproduktionsfaktor $k_{\infty} = 1.07$ angegeben. Es entstehen also sogar im allerbesten, stark idealisierten Falle nur 7 % mehr Neutronen als zur Aufrechterhaltung der Reaktionskette unbedingt erforderlich sind. *Fermi* und seine Mannschaft erreichten die kritische Größe, indem sie die Bausteine des Reaktors Stück für Stück aufeinander-

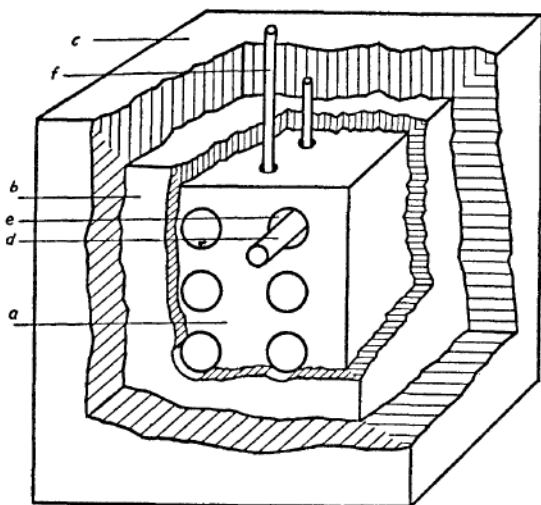


Abb. 23

Schematische Anordnung der wichtigsten Teile eines Reaktors (Uranmeiler, Pile)

- a ... würfelförmiger Block aus reinstem Graphit (Kohlenstoff) als Moderator;
- b ... Mantel aus Graphit als Reflektor;
- c ... Strahlenschutzmantel aus Beton;
- d ... Stäbe aus reinstem Uran (werden in sämtliche Bohrungen des Moderators eingeführt);
- e ... Bohrkanäle, in denen ein Kühlmittel die eingeschobenen Uranstäbe umspült;
- f ... Regulierstäbe aus Kadmium oder Bor.

türmten und laufend Messungen der Neutronendichte (Zahl der Neutronen im Kubikzentimeter) anstellten. Beim Überschreiten der kritischen Masse schoß die Dichte plötzlich gewaltig in die Höhe.

Aus Gründen der Materialersparnis will man die kritische Masse niedrig halten. Ein wichtiges Mittel zur Herabsetzung der kritischen Masse bei vorgegebener Zusammensetzung des Reaktors besteht darin, den Reaktor mit einem *Mantel* aus geeignetem Material, z. B. Graphit, zu umgeben. Dann wird nämlich ein Teil der entweichenden Neutronen durch den Mantel in den Reaktor zurückgeworfen (*reflektiert*) und dadurch nutzbar gemacht. Durch diese Ersparnis an Neutronen beginnt die sich selbst fortpflanzende

Reaktionskette schon bei geringerem Volumen. Der Mantel wird als *Reflektor* bezeichnet. Er liegt innerhalb des aus Beton bestehenden „biologischen“ *Strahlenschutzmantels* (Abb. 23).

Ein wichtiger Punkt bei der Konstruktion von Reaktoren, besonders von Reaktoren auf der Grundlage von Graphit, ist noch nicht erwähnt worden. Rechnung und Experiment zeigen nämlich, daß es sich empfiehlt, Uran und Moderator nicht einfach zu mischen, sondern das Uran in Form von Blöcken oder Stangen in regelmäßigen Abständen in der Masse des Moderators zu verteilen. In Analogie zu einem Kristallgitter spricht man von einer *Gitterstruktur*. Der Zweck dieser Anordnung wird klar, wenn wir folgendes überlegen: Die Neutronen werden vom Uran im Augenblick der Kernspaltung als *schnelle* Neutronen emittiert. Sie werden durch den Graphit verlangsamt, müssen aber, da sie doch erst als ganz *langsame* Neutronen wirksam werden sollen, so weit als möglich daran gehindert werden, schon *während* der Verlangsamung auf Uran zu treffen. Dies wird dadurch erreicht, daß man sie bei der Emission in reinen Graphit eintreten läßt, in dem sie ihre Energie abgeben; erst nach längerer Wanderung im Graphit treffen dann die Neutronen wieder als langsame Neutronen auf Uran und können nunmehr bevorzugt auf Uran 235 einwirken. *Alle Graphitreaktoren sind nach diesem Gitterprinzip* (oder, wie man auch sagt, „heterogen“) *gebaut*. Dagegen gibt es unter den mit schwerem oder leichtem Wasser arbeitenden Reaktoren auch „homogene“ Typen, die Uran in inniger Mischung mit dem Moderator, z. B. als Lösung einer Uranverbindung, enthalten.

Der Aufbau von Reaktoren

Stufen des Reaktorenbaues

Wahrscheinlich muß jedes Land, das Atomenergie verwerten will, sich dem Ziel in mehreren Stufen nähern. Die Probleme der Atomenergie sind von den herkömmlichen technischen Problemen so verschieden, daß es gewiß schwierig ist, auf den ersten Anhub eine Großanlage zu errichten. Vielmehr wird man gewöhnlich als ersten Reaktor eine Kleinanlage aufstellen, um Material und Instrumente zu prüfen und Personal zu schulen. Wahrscheinlich wird man als zweiten Schritt eine Anlage mittlerer Größe bauen, an der man Probleme der Kühlung, des Strahlenschutzes usw. studieren kann. Die Anlagen dieser Größe sind auch zur Herstellung künstlicher Radioelemente sehr geeignet. Erst im dritten Stadium wird man eine richtige Fabrik, eine Großanlage zur Erzeugung nutzbarer Wärme oder von Sprengstoff, aufstellen können.

Derzeit (Ende 1955) befinden sich Schweden und Norwegen im ersten Stadium, Frankreich und Kanada liegen im zweiten Stadium und die Vereinigten Staaten, die UdSSR und Großbritannien haben das dritte Stadium erreicht. Bauprojekte und im Bau befindliche Anlagen gibt es in mehreren Ländern. Zu diesen Ländern gehören in Westeuropa Belgien, die Schweiz und Italien. Die Sowjetunion hilft China und mehreren befreundeten Staaten Europas beim Bau von Reaktoren mittlerer Größe, so daß diese Staaten auf Grund der ihnen zugänglich gemachten Erfahrungen die erste Stufe überspringen.

In jedem Reaktor, was immer sonst seine Art sei, entspricht eine Leistung von einem Watt etwa 30 Milliarden Spaltungen pro Sekunde.

Nachdem er hinreichend lange gelaufen ist, daß sich die Neubildung von *Spaltprodukten* und deren Zerfall annähernd die Waage halten, beträgt die Aktivität der Spaltprodukte etwa 6 Curie pro Watt. Der Austritt dieser Spaltprodukte stellt die Hauptgefahr dar, wenn die Kontrollmechanismen eines Reaktors versagen und man die Herrschaft über ihn verliert, wenn also der Reproduktionsfaktor dauernd 1 übertrifft und sich die Leistung immer weiter steigert. Eine solche Katastrophe trat 1952 in Kanada ein, wo die Kontrollen einer Großversuchsanlage versagten. In kurzer Zeit verbreiteten sich 10.000 Curie Spaltprodukte aus den beschädigten Uranstäben mit dem Moderator- und Kühlwasser über die Anlage. Eine radioaktive Wolke hüllte das Gebäude ein. 2000 Personen mußten rasch fortgebracht werden. Nur mit beträchtlichen Schwierigkeiten konnte die Anlage innerhalb von 14 Monaten wiederhergestellt werden.

Dagegen ist eine richtige *Explosion* eines Reaktors in einem solchen Falle nicht zu befürchten und ist auch in Kanada nicht eingetreten. Die Kettenreaktion wird ja in der Regel durch *langsame* Neutronen (Geschwindigkeit: zirka 2 km pro Sekunde) fortgepflanzt. Diese gelangen daher nur langsam zu reaktionsfähigen Kernen. Ein weiterer Sicherheitsfaktor liegt darin, daß ein Teil der Neutronen gar *nicht prompt*, sondern *verzögert* entsteht (siehe die folgende Seite). Dieser Faktor wird übrigens auch bei den mit *schnellen* Neutronen arbeitenden Reaktoren ausgenutzt.

So kann der Reaktor nur in relativ gemächlichem Tempo beschädigt werden und wird schließlich schmelzen. Bevor noch sehr viel Energie entwickelt wurde, bricht die Kettenreaktion ab.

Reaktoren der Stufe I (energielose Reaktoren)

Die Kleinreaktoren, also Reaktoren von der Art des 1942 in Chicago in Betrieb genommenen Reaktors, werden auch als *energielose* Anlagen bezeichnet. Die Energie, die sie entwickeln, ist nämlich noch sehr gering. Der Chicagoer Reaktor lief zunächst mit einer Leistung von $\frac{1}{2}$ Watt, später mit 200 Watt Leistung. Die Energie

hätte also, wenn man sie überhaupt hätte verwenden können oder wollen, nur zum Betrieb einer besseren Glühlampe gereicht. Daher ist beim Kleinreaktor keine Kühlung nötig. Auch genügen einfache Maßnahmen zum Strahlenschutz. Der Reaktor *Fermis* bestand aus natürlichem Uran und Graphit, doch sind seither energielose Anlagen der verschiedensten Typen zu Versuchszwecken errichtet worden. Allen diesen Anlagen ist gemeinsam, daß die Neutronendichte bescheiden ist.

Eines der wichtigsten praktischen Ergebnisse, die beim Betrieb energieloser Reaktoren erhalten werden, ist die Erkenntnis ihrer leichten Regulierbarkeit. Man muß, wenn man die Leistung des Reaktors konstant halten will, mit konstanter *Neutronendichte* arbeiten, d. h. den Reproduktionsfaktor k auf 1 erhalten. Nun findet man, daß die herrschende Neutronendichte im Laufe der Zeit spontan nur langsamen und unbedeutenden Schwankungen unterliegt. Der Reaktor ist also sehr „träge“. Das Bedienungspersonal kann lässig in Lehnstühlen Zigaretten rauchen. Nur in größeren Zeitabständen ist eine leichte Änderung der Einstellung des Kontrollmechanismus erforderlich. Diese erstaunliche und günstige Tatsache kommt daher, daß ein kleiner Teil der Neutronen (zirka 1%) erst viele Sekunden nach der Kernspaltung geboren wird (*verzögerte Neutronen*). Wenn also durch irgendeinen Umstand der Reproduktionsfaktor über 1 gestiegen ist, kann sich diese Steigerung doch erst nach dem Eintreffen der „Nachzügler“ voll auswirken. Infolgedessen steigt die Neutronendichte nicht innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde an, wie es der Fall wäre, wenn der Reproduktionsfaktor auf Grund der *prompten* (nicht verzögerten) Neutronen *allein* den Wert 1 überschritten hätte, sondern bloß innerhalb von vielen Minuten.

Wie reguliert man nun die Neutronendichte? Es gibt gewisse Stoffe, die langsame Neutronen besonders heftig absorbieren. Es sind die gleichen Stoffe, die man zur Vermeidung parasitärer Absorption mit größter Sorgfalt aus den beim Reaktorenbau verwendeten Werkstoffen entfernen muß. Zu ihnen gehören das *Bor*, ein nichtmetallisches Element, und das *Kadmium*, ein in der Natur gewöhnlich mit dem Zink vergesellschaftetes Metall. Man verwendet also zur Regulierung der Neutronendichte Stäbe aus diesen Stoffen. Die Stäbe können

tiefer oder weniger tief ins Innere des Reaktors gesenkt werden und absorbieren je nachdem mehr oder weniger Neutronen. Dadurch wird der Reproduktionsfaktor beeinflusst. Außer diesen *Regulierstäben* gibt es dann noch einen ebenfalls Bor oder Kadmium enthaltenden *Sicherheitsstab*. Dieser fällt automatisch in den Reaktor, sobald die Neutronendichte ein zulässiges Höchstmaß überschreitet, d. h. wenn der Reaktor außer Rand und Band zu geraten droht. Sobald der Sicherheitsstab in den Reaktor fällt, kommt die Reaktion sofort zum Stillstand.

Übrigens sind, wenigstens bei energielosen Reaktoren, die meisten Schwankungen durch Änderungen des *Luftdrucks* verursacht. Der Stickstoff der Luft ist ein mittelguter Neutronenabsorber. Die Menge Stickstoff, die sich in den Ritzen und Spalten des Reaktors befindet, hängt aber vom Luftdruck ab. Bei anhaltend schönem Wetter muß man daher die Regulierstäbe weiter aus dem Reaktor herausziehen!

Das *Anheizen eines Reaktors* erfolgt demgemäß auf die folgende Weise: Für die Anwesenheit einiger Neutronen, die die Kette beginnen können, muß man nicht Sorge tragen, eine eigene Neutronenquelle ist nicht nötig. Die *kosmische Strahlung* liefert stets einige Neutronen; außerdem entstehen bei der *spontanen Kernspaltung* des Urans ebenfalls Neutronen (siehe S. 103). Man stellt zunächst die Reguliervorrichtungen so ein, daß der Reproduktionsfaktor etwas größer als 1 ist, aber doch noch einen vernünftigen Wert behält. Zum Beispiel mag es bequem sein, wenn die Neutronendichte sich innerhalb jedes Zeitraumes von einigen Minuten verdoppelt. Man läßt also die Neutronendichte auf diese Weise immer weiter zunehmen, bis die für den Dauerbetrieb des Reaktors gewünschte Dichte erreicht wird. Dann werden die Regulierstäbe tiefer gesenkt, bis der Reproduktionsfaktor sich auf einen Wert von genau 1 vermindert. Von da an bleibt die Neutronendichte und damit auch die Leistung des Reaktors auf konstantem Niveau.

Wie hängt die *erreichbare Leistung* von der Bauart des Reaktors ab? Wenn die Antwort von einem rein theoretischen Standpunkt gegeben werden soll, lautet sie überraschenderweise: *gar nicht*. Nehmen wir an, der Reproduktionsfaktor k sei größer als 1, z. B. 1·01; in jeder Generation sollen also um 1% mehr Neutronen vorhanden sein als

in der vorangegangenen Generation. Dann haben wir in der dritten Generation offenbar das 1·01fache der Neutronenzahl der zweiten Generation, also im ganzen das $1·01 \times 1·01 = 1·0201$ fache der ursprünglichen Neutronendichte usw. Man sieht, daß die Leistung sich ständig steigert, ohne daß eine obere Grenze erreicht wird. Ein Reproduktionsfaktor von 1·01 ist beträchtlich. Nehmen wir also einmal an, der Reproduktionsfaktor sei nur 1·001. Eine analoge Überlegung zeigt uns, daß auch jetzt *jede beliebige Leistung* erreicht werden kann, wenn man nur genügend viele Generationen lang zuwartet. Das heißt aber, daß die *schließlich erreichbare Leistung überhaupt nicht vom Wert des Reproduktionsfaktors und damit auch nicht von Bauart und Größe des Reaktors abhängt* — vorausgesetzt bloß, daß der Reproduktionsfaktor überhaupt größer als 1 ist. Ist sein Wert kleiner (natürlich aber größer als 1), so dauert das Erreichen einer bestimmten vorgegebenen Leistung, mit der man arbeiten will, eben nur länger, doch wird die Leistung früher oder später erreicht.

Heißt das nun, daß man mit dem kleinsten und bescheidensten Reaktor tatsächlich jede beliebige Leistung erzielen kann — vorausgesetzt nur, daß der Reproduktionsfaktor k überhaupt größer als 1 ist? Theoretisch: ja — praktisch: nein. Eine hohe Leistung bedeutet eine entsprechende Wärmeentwicklung. Die Wärme muß rasch abgeleitet werden, wenn die Temperatur des Reaktors sich nicht zu sehr steigern soll. Die Wärmeabfuhr bei vorgegebener Leistung ist aber leichter, wenn der Reaktor groß ist, wenn also die äußere Oberfläche größer ist und auch eine größere kühlbare innere Oberfläche geschaffen werden kann. In der Praxis wird also im allgemeinen ein Reaktor um so größer sein müssen, eine je größere Leistung von ihm erwartet wird. Auch hängt die Wärmeabfuhr und damit die Leistung in äußerst starkem Maße von der Bauart des Reaktors ab, worauf noch zurückgekommen wird.

Die *Bildtafel* bei Seite 129 unten zeigt den von *Joliot* im alten Fort Châtillon (Paris) unter großen Schwierigkeiten errichteten Reaktor. Er wurde am 15. Dezember 1948 in Betrieb genommen und heißt „Zoé“ (der Name ist gebildet aus den Bezeichnungen: Z = Zéro [= Null, d. h. energielos], O = Oxyd, E = Eau lourde [= schweres Wasser]); der Reaktor arbeitet nämlich mit Uranoxyd und schwe-

rem Wasser). Man sieht den würfelförmigen Betonmantel, der den Reaktor umgibt. Die Leistung betrug etwa 5 kW. Die kamintürchen-ähnlichen Öffnungen in der rechten Betonwand unterhalb des Vorhangs führen in die Bestrahlungsstollen. Die zu beiden Seiten des Tischchens an der Wand lehrenden langen Haken dienen zum Ausbringen der bestrahlten Substanzen, die dem menschlichen Körper nicht zu nahe kommen dürfen. Auf dem Tischchen steht ein Bleipanzern zur Aufbewahrung der strahlenden Stoffe. Die wahren Dimensionen der ganzen Anlage ergeben sich aus einem Vergleich mit dem an der linken Betonwand vor dem Röhrensystem stehenden Sessel. Später wurde die Leistung der Anlage gesteigert.

Es gibt auch viel kleinere energielose Versuchsanlagen, die mit konzentriertem Spaltstoff, beispielsweise Uran 235, betrieben werden. Da das kritische Volumen solcher Reaktoren unter Umständen nur wenige Liter beträgt, finden sie in einem Zimmer Platz.

Reaktoren der Stufe II (Großversuchsanlagen)

Ein Reaktor der mittleren Stufe (*Abb. 23*, S. 117) mag einige tausend Kilowatt Leistung entwickeln. Das Problem der Kühlung wird also akut. Vor allem muß das Uran selbst gekühlt werden, da die meiste Energie *innerhalb* des Urans entsteht.

Wie stark das Uran erhitzt werden darf, hängt von zwei Umständen ab. Erstens treten bei erhöhter Temperatur Veränderungen des Metalls ein, durch die seine mechanische Festigkeit herabgesetzt wird. Die Temperatur, bei der diese Veränderungen eintreten, wird durch die Verwendungsform des Elements bestimmt; es kann als reines Metall oder in Legierung (z. B. mit Aluminium) eingesetzt werden. Zweitens wird bei hoher Temperatur — vor allem bei Verwendung gewisser Kühlmittel — das Uran vom Kühlmittel chemisch angegriffen.

Der Schutz erfolgt durch einen dichten *Überzug*. Dieser verhindert gleichzeitig, daß radioaktive Spaltprodukte durch das Kühlmittel mitgerissen werden. Die Herstellung dieser Überzüge ist ein

schwieriges Problem der Atomtechnik. Sie müssen aus einem widerstandsfähigen, an Uran gut haftenden Metall bestehen, das Neutronen nur wenig verschluckt. Ursprünglich verwendete man allgemein *Aluminium*, doch zieht man jetzt das chemisch und gegen Wärme besser widerstandsfähige *Zirkonium* vor. Dieses in der Natur nicht seltene Element hatte bisher so gut wie keine technische Verwendung gefunden. Wenn man sich größere Verluste an Neutronen leisten kann, kann man auch mit Vorteil *rostfreien Stahl* verwenden.

Wenn das Uran in Blöcken vorliegt, ist seine Kühlung schwierig. Es empfiehlt sich daher, das Uran in *Stangen-* oder *Röhrenform* zu verwenden. Die Stangen können parallel zueinander horizontal oder vertikal den Graphit oder das schwere Wasser durchziehen wie Eisenstäbe den Beton. Um jede Stange ist ein konzentrischer runder Kanal offen gelassen, durch den das Kühlmittel strömt.

Als *Kühlmittel* kommen Gase oder Flüssigkeiten in Betracht. Das Kühlmittel muß chemisch träge sein, damit es die Haut des Urans nicht angreift und — wenn es im Kreislauf zurückgeführt wird — damit es sich nicht zersetzt. Es muß die Wärme gut abführen. Es darf nicht viele Neutronen schlucken. Leider gibt es kein ideales Kühlmittel, das alle diese Anforderungen in gleicher Weise erfüllt. Für Großversuchsanlagen kommen praktisch hauptsächlich Luft, Kohlensäure, Helium oder Wasser in Betracht. Das Kühlmittel wird durch die Kanäle gepumpt. Das Pumpen erfordert viel Energie. Flüssigkeiten kühlen natürlich besser als Gase.

Der *Strahlenschutz* muß bei den Großversuchsanlagen schon ernst genommen werden. Da jedem Watt Leistung 6 Curie an Spaltprodukten entsprechen, ist schon die in einem Reaktor von 1000 Kilowatt entstehende Gammastrahlung größenordnungsmäßig mit der Strahlung von 6 Tonnen Radium vergleichbar. Außerdem ist der Reaktor eine starke Neutronenquelle. Allerdings wird der Hauptteil der Strahlung — selbst der durchdringenden Gammastrahlung — innerhalb des Reaktors verschluckt.

Ein geeignetes Material für einen Schutzmantel ist *Beton*. Durch seinen Wasserstoffgehalt werden die Neutronen verlangsamt und dann leicht absorbiert; gleichzeitig wird die Gammastrahlung zurückgehalten. Auch *Wasser* eignet sich als „biologischer“ Schutz.

Die Erzeugung von Radioelementen in Reaktoren

Ein äußerst wichtiges Nebenprodukt beim Betrieb der Reaktoren sind *künstliche Radioelemente*. Kernumwandlungen können besonders leicht durch Neutronen bewirkt werden (siehe S. 79). Wenn man daher geeignete Stoffe in die besonderen Bestrahlungsstellen der Reaktoren einbringt, so werden — meist durch einfache Anlagerung von Neutronen an die Atomkerne der eingebrachten Substanzen — *radioaktive Isotope* der auf diese Weise bestrahlten Elemente erzeugt; dabei ist die umgewandelte Menge infolge der hohen Neutronendichte sehr groß. Andere Radioelemente wieder kann man in Reaktoren durch *Kernspaltung von Uran* herstellen, d. h. man verwendet die radioaktiven Spaltprodukte. Das diesem Zweck dienende Uran kann besonders bestrahlt werden, oder man verwendet die Spaltprodukte, die sich in den Uranstäben ohnehin in gewaltiger Menge ergeben.

Die durch *Neutroneneinfang* oder durch *Kernspaltung* erzeugten *Radioelemente* finden ausgedehnte Verwendung. In Reaktoren der Stufe II können viel größere Mengen an Radioelementen als im Laboratorium hergestellt werden. Tatsächlich werden von den dazu bestimmten Versuchsanlagen alljährlich zehntausende Packungen radioaktiver Stoffe in alle Welt verschickt. Manche dieser Packungen haben Stärken von 1000 Curie und mehr. Von ihrer Verwendung wird in der Folge ausführlich die Rede sein.

Reaktoren der Stufe III (Sprengstoffabriken und Kraftwerke)

Die Reaktoren der dritten Stufe, also der Endstufe, stellen regelrechte Fabriken dar. Wie weiter unten erklärt werden soll, können sie im Prinzip entweder der Erzeugung nützlicher Energie oder aber der Produktion von Explosivstoffen dienen. Die Leistung eines Reaktors kann mehrere hunderttausend Kilowatt betragen. Zum Vergleich: Das größte Kraftwerk der Welt, das im Bau befindliche Wolgakraftwerk in Kuibyschew, wird 2,2 Millionen Kilowatt leisten. In einer modernen Industriestadt von einer Million Einwohnern

entspricht der durchschnittliche Jahresbedarf an Strom ungefähr 200.000 Kilowatt; zur Zeit der Verbrauchsspitzen ist der Bedarf allerdings wesentlich größer.

Eine charakteristische Eigenschaft der Reaktoren der Stufe III ist, daß das Uran von Zeit zu Zeit dem Reaktor entnommen werden und chemisch behandelt werden muß. Bei jeder Kernspaltung bleiben ja zwei Spalttrümmer übrig. Im Laufe der Zeit sammeln sich diese *Spaltprodukte* im Uran an. Manche der Spaltprodukte absorbieren langsame Neutronen intensiv und wirken daher als „Parasiten“. Wenn die Parasiten nicht von Zeit zu Zeit entfernt werden, kommt die Kettenreaktion ins Stocken. Der Reproduktionsfaktor sinkt unter den Wert 1, die Kettenreaktion wird „vergiftet“. Daher werden die Spaltprodukte nach Auflösen des Urans chemisch entfernt. Ein weiterer Grund für die Auflösung besteht darin, daß das Uran und seine Metallhülle durch die ständige intensive Bestrahlung allmählich beschädigt werden und an Festigkeit verlieren. Das Uran wird natürlich wiedergewonnen. Ebenfalls wiedergewonnen wird das wertvolle *Plutonium* (siehe Seite 129), das sich während des Reaktorbetriebes bildet.

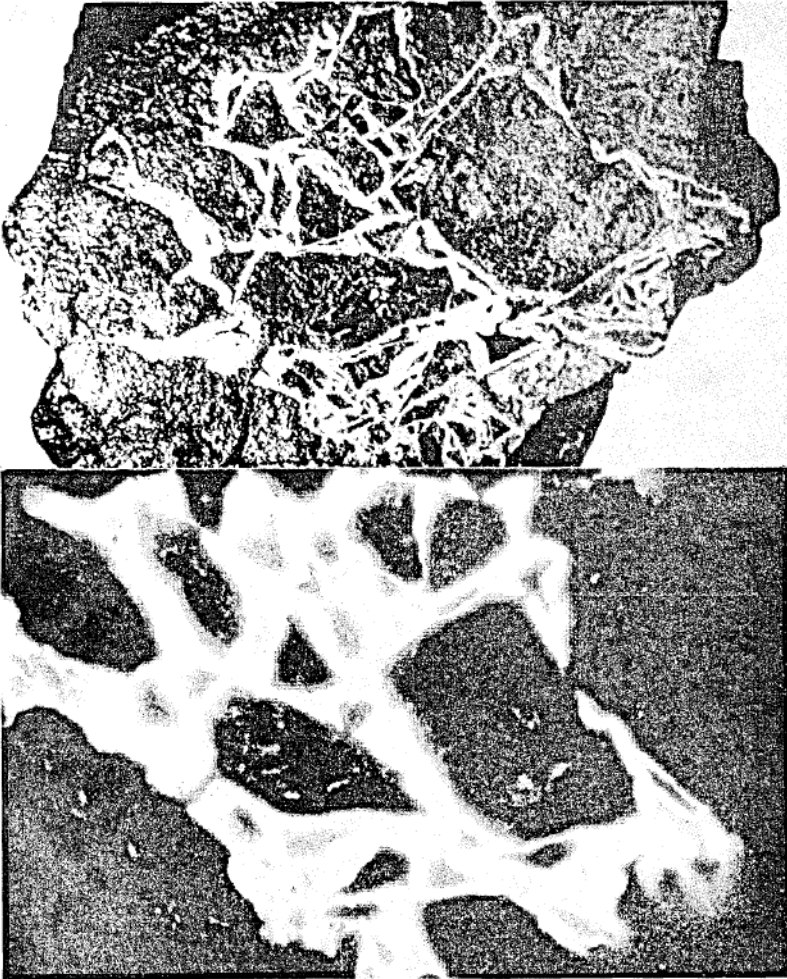
Alle diese der Entfernung der Spaltprodukte dienenden Operationen können aber nicht unmittelbar durch Arbeiter ausgeführt werden. Die Anwesenheit der intensiv radioaktiven Spaltprodukte im Uran bringt es nämlich mit sich, daß von dem aus dem Reaktor herausgezogenen Uran eine verheerende Strahlung ausgeht. Daher erfolgen die erwähnten chemischen Operationen durch Fernsteuerung. Automatisch werden die Uranstäbe in Wannen aufgelöst, die Lösungen den verschiedensten Umsetzungen unterworfen und die Reaktionsprodukte voneinander getrennt. Dieses Verfahren steht in der Geschichte der Technik ohne Beispiel da.

Die von spaltbarer Substanz befreiten, hoch radioaktiven Lösungen, die übrig bleiben und die Spaltprodukte enthalten, werden bisher in der Regel gänzlich verworfen. Mit großem Vorteil läßt man die Lösungen aber noch eine Zeitlang in einer Art von Klärteichen stehen, bevor man sie in Flüsse oder ins Meer ableitet, damit die Aktivität inzwischen einigermaßen abklingen kann. Es bestünde sonst die Gefahr, daß Lebewesen, besonders Fische, aktive Substanzen

in ihrem Körpergewebe speichern, so daß über diesen Umweg radioaktive Vergiftungen beim Menschen entstehen könnten. In dieser Hinsicht gewinnt man besondere Sicherheit, wenn man die Spaltprodukte durch geeignete, billige Stoffe, z. B. Ton, bindet und diesen dann in dicht schließenden, widerstandsfähigen Behältern vergräbt oder in den Ozean versenkt. Dort verlieren die Spaltprodukte im Laufe der Jahrtausende durch Abklingen ihre Radioaktivität.

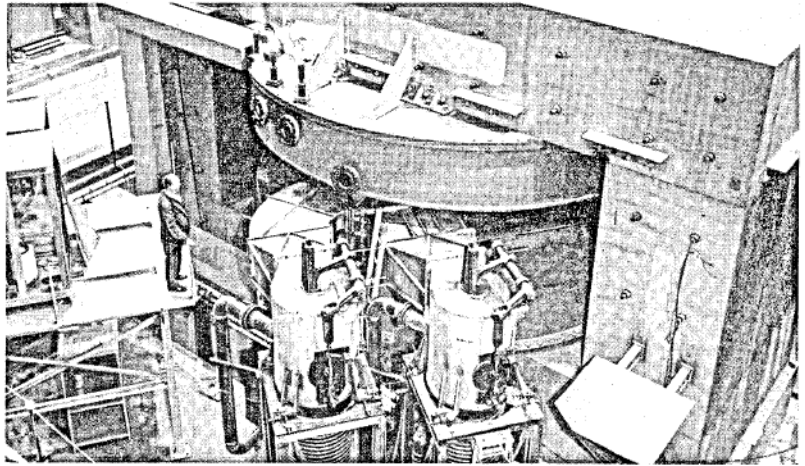
Homogene Reaktoren

Die Wiederherstellung des Uranmetalls nach der Auflösung ist unbequem und kostspielig. Deshalb hat man versuchsweise *homogene* Reaktoren gebaut, in denen das Uran von vornherein in Lösung vorliegt und nicht in Metallform gebracht werden muß. Ein homogener Reaktor kann beispielsweise eine Lösung von Uransulfat in schwerem Wasser enthalten. Die Spaltprodukte müssen von Zeit zu Zeit entfernt werden, doch erspart man sich die Umwandlung des aufgelösten Urans in das Metall. Ein wichtiger Nebenvorteil dieser Anordnung besteht darin, daß die Kühlung des Urans gut verläuft, weil ja jedes Uranatom unmittelbar vom Kühlmittel (schwerem Wasser) umspült ist. Auch das Problem des Korrosionsschutzes des Uranmetalls fällt weg. Andererseits ist die Handhabung des im Gemisch mit dem gelösten Uransalz vorliegenden kostbaren schweren Wassers schwierig, wenn hohe Leistungen zu erzielen sind. Erreicht doch sein Dampf bei der herrschenden Temperatur sehr hohen *Druck*! Ein besonderes Problem ist auch die *Zersetzung* des schweren Wassers durch die Strahlung. Dabei bildet sich eine explosive Mischung von schwerem Wasserstoff und Sauerstoff, also *Knallgas*. Um den schweren Wasserstoff nicht zu verlieren, muß man ihn ständig wieder zu schwerem Wasser verbrennen, was z. B. an Katalysatoren (Reaktionsbeschleunigern) aus Platin gelingt. Es gibt allerdings auch homogene Reaktoren, die mit *leichtem* Wasser arbeiten; dann muß aber das Uran mit dem Isotop 235 angereichert sein.

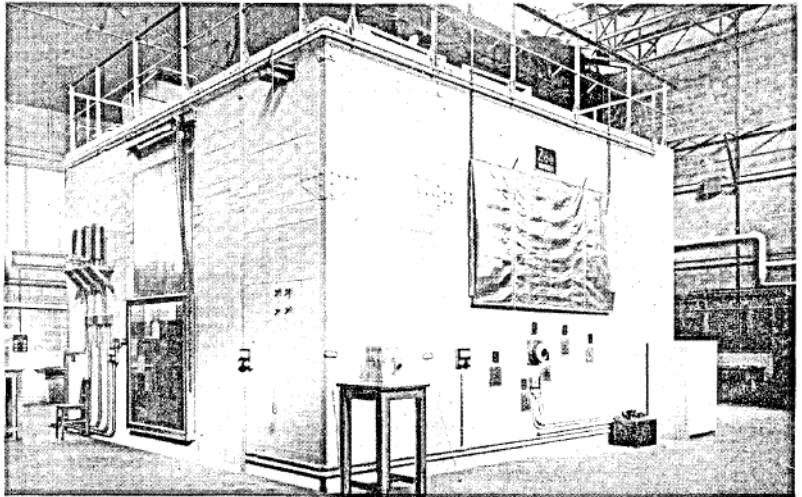


Autoradiographie eines Schliffes von kanadischer Pechblende (unten). Die weißen Adern sind radioaktiv. Zum Vergleich ist auch eine gewöhnliche Photographie des gleichen Schliffes wiedergegeben (oben).

(Aufnahme M. Déribère)



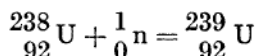
Ansicht eines im Bau begriffenen Zyklotrons
Der Mann links gibt einen Begriff von den Größenverhältnissen.



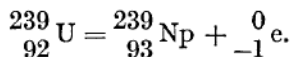
Energieloser Reaktor „Zoé“ im Fort Châtillon in Paris

Die Entstehung von Plutonium

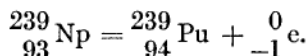
Auf Seite 126 wurde erwähnt, daß in den Produktionsanlagen Wärme und Sprengstoff erzeugt werden können. Um dies zu verstehen, tragen wir nun Überlegungen über das Schicksal der zahlreichen langsamen Neutronen nach, die vom Uran 238 eingefangen werden. Sie können keine Kernspaltung verursachen. Vielmehr werden sie an die Atomkerne des Uran 238 angelagert. Wir werden gleich sehen, daß auf diese Weise der Atomsprengstoff *Plutonium* erzeugt wird. Der zunächst durch die Reaktion



entstehende Atomkern des Urans 239 ist nämlich sehr kurzlebig und geht durch Betazerfall mit 23 Minuten Halbwertszeit in einen Kern mit der Ladungszahl 93 — solche Kerne gibt es in der Natur nicht — über:



Es handelt sich also um ein Isotop eines künstlichen chemischen Elements (*Neptunium*). Der entstandene Kern unterliegt wieder einem Betazerfall und zerfällt mit der Halbwertszeit von 2·3 Tagen gemäß



Es bildet sich ein Kern der Ladungszahl 94 — ebenfalls in der Natur unbekannt. Das entsprechende Element führt jetzt den Namen *Plutonium*. Die Namen Neptunium (Symbol Np) und Plutonium (Symbol Pu) wurden den neuen Elementen von ihrem Entdecker *Seaborg* nach den äußersten Planeten unseres Sonnensystems, Neptun und Pluto, gegeben. Ebenso war das Uran zur Zeit seiner Entdeckung Ende des 18. Jahrhunderts nach dem damals neuentdeckten Planeten Uranus benannt worden.

In den letzten Jahren wurden auch die Elemente 95, 96, 97, 98, 99, 100 und 101 synthetisch dargestellt, doch haben sie noch keine praktische Bedeutung gewonnen. Auch gibt es keine äußeren Planeten mehr, nach denen man sie benennen könnte! Die Elemente 95 bis 101 erhielten die Namen *Americium*, *Curium*, *Berkelium*,

Californium, Einsteinium, Fermium und *Mendelevium*. Die Elemente 93 bis 101 sind übrigens dem Uran recht ähnlich; sie alle sind leicht oxydierbare Schwermetalle. Da sie in der Reihe der Elemente, also im Periodischen System, jenseits des Urans stehen, werden sie als *Transurane* bezeichnet.

Das Plutonium (genauer: das Plutoniumisotop der Kernmasse 239) ist relativ langlebig (Halbwertszeit: 24.000 Jahre). Das Element kann daher aus dem Reaktor gewonnen werden, ohne daß es während der Prozedur in merklichem Ausmaß zerfallen würde. Das Plutonium 239 zerfällt spontan unter Emission von Alphastrahlung, läßt sich aber ähnlich wie Uran 235 sowohl durch schnelle als auch durch langsame Neutronen leicht spalten. Es wird daher sowohl als Explosivstoff als auch zur „Belebung“ von Reaktoren sehr gesucht. Derzeit (1955) wird ein Preis von 20 Dollar je Gramm Plutonium angegeben: es ist 500mal teurer als das natürliche Uran und kostet etwa ebensoviel wie Uran 235.

Das Nettoergebnis des Einfangs von Neutronen durch Uran 238 ist also die Bildung einer Art synthetischen Ersatzstoffes für das natürliche Uran 235. Aber der Ersatzstoff hat gegenüber dem Naturprodukt einen enormen Vorteil: er unterscheidet sich *chemisch* vom Uran und damit auch vom Uran 238; Plutonium ist eben *kein Isotop* des Urans. Es kann daher auch chemisch abgetrennt werden, während das Uran 235 chemisch vom Uran 238 nicht getrennt werden kann (vgl. Seite 70).

Die *chemische Abtrennung* des Plutoniums erfolgt aus den Lösungen des Urans, die bei seiner Reinigung von den kettenvergiftenden Spaltprodukten erhalten werden (siehe Seite 127). Sie gelingt entweder durch Fällung mit geeigneten Reagenzien oder durch Extraktion mit bestimmten organischen Lösungsmitteln. Bei der Arbeit mit Plutonium — ähnlich wie bei jener mit den Spaltprodukten — muß man sich sehr vor der Aufnahme auch nur der geringsten Spuren in den Körper hüten. Das Plutonium lagert sich auf Grund seiner chemischen Natur nahe dem Knochenmark ab und zerstört es allmählich durch seine Alphastrahlung. Die Erzeugung des *metallischen Plutoniums* wird im Anschluß an die des metallischen Urans auf Seite 143 besprochen.

Die Züchtung von Spaltstoff

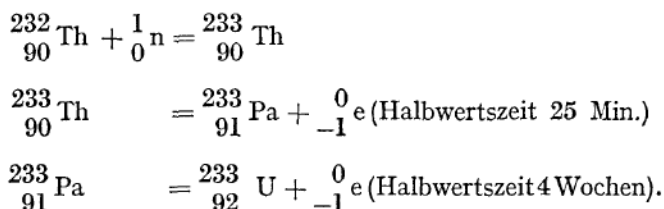
Hier beginnt nun klar zu werden, warum die Gewinnung nutzbarer Energie einerseits und die Erzeugung von Bomben andererseits miteinander unverträgliche Zielsetzungen sind. Während des Ablaufes der Kettenreaktion wird ja ständig Uran 235 verbraucht, das zu Beginn allein die Kette aufrechterhält. Wenn man nun das Plutonium im Reaktor beläßt, so wirkt es in dem Maße seiner Entstehung an der Aufrechterhaltung der Kette mit, da es wie Uran 235 leicht (auch durch langsame Neutronen) spaltbar ist. Grundsätzlich das gleiche gilt, wenn man aus technischen Gründen zwar das entstandene Plutonium aus dem Uran abtrennt, es aber dann in gereinigter Form an bestimmte Plätze des Reaktors zurückführt.

Indem das Plutonium gespalten wird, wobei neue Neutronen frei werden, erzeugt es weiteres Plutonium. Man kann nun fragen, ob *mehr* oder *weniger* Plutonium entsteht, als dem Verbrauch von Uran 235 und später von Plutonium entspricht. Im ersteren Falle kann grundsätzlich allmählich das *gesamte Uran 238* in nutzbaren Spaltstoff verwandelt (*konvertiert*) werden. Aber selbst wenn sich etwas weniger Plutonium bildet, als dem verbrauchten Spaltstoff entspricht, kann doch im Laufe der Reaktion ein erheblicher Teil des Uran 238 verwertet werden. Genauere Untersuchungen haben gezeigt, daß eine mehr als 100 %ige Konversion zwar nicht in einem der bisher beschriebenen, mit langsamen Neutronen arbeitenden und allein auf Uran basierenden Reaktoren, wohl aber in einem mit *schnellen* Neutronen arbeitenden Reaktor, der auch *Thorium* enthält, gelingt (siehe folgende Seite).

Die Möglichkeit der mindestens sehr weit gehenden Konversion hat uns auf Seite 95 berechtigt, bei der Abschätzung der Atomenergie als Energiequelle die *gesamte* Uranmenge und nicht nur die Menge des Uran 235 in Rechnung zu stellen. Die Lage in einem mit natürlichem Uran arbeitenden Reaktor ist somit diese: Im ersten Augenblick, also für die *Auslösung* einer Kettenreaktion, kommt so gut wie ausschließlich das Uran 235 in Betracht. Das Uran 238 wirkt sich, weil es langsame Neutronen einfängt, ohne unmittelbar Neutronen zu liefern, auf den Reproduktionsfaktor ungünstig aus. Sobald

aber die Reaktionskette überhaupt in Gang gekommen ist, dient auch das Uran 238 auf dem Weg über Plutonium als Spaltstoff; man „züchtet“ oder „brütet“ also im Laufe der Kettenreaktion automatisch neuen Spaltstoff.

Besonders interessant sind die neuerdings studierten *Brutreaktoren*, die das sonst für Atomenergiezwecke nutzlose Element *Thorium* enthalten. Thorium selbst ist, ähnlich wie Uran 238, nur schwer spaltbar. Durch langsame Neutronen wird es — so wie dieses — überhaupt nicht gespalten. Aber im Thorium läuft bei Bestrahlung mit langsamen Neutronen eine Reaktionskette ab, die der Reaktionskette vom Uran 238 zum Plutonium ähnlich ist:



Das schließlich entstehende Uranisotop 233 ist langlebig und kann leicht chemisch vom Thorium getrennt werden. Es ist, ebenso wie Uran 235 und Plutonium 239, leicht — z. B. schon durch langsame Neutronen — spaltbar. Auf diese Weise gelingt es, aus dem selbst unwirksamen Thorium wertvollen Spaltstoff zu gewinnen. Dieser Spaltstoff, nämlich das Uran 233, kann nun ebenso wie Plutonium entweder zur Belegung eines Reaktors oder als Explosivstoff verwendet werden.

Schließlich kann man auch aus dem neugewonnenen Spaltstoff (Plutonium oder Uran 233) für sich allein einen neuen Reaktor bauen, *ohne natürliches Uran zu verwenden*. Dann kann man auf die Verlangsamung der Neutronen, durch die ja der Verlust durch Einfang in Uran 238 innerhalb des Reaktors herabgesetzt werden soll, verzichten. Es entfällt somit nicht nur dieser Verlust selbst, sondern auch der Verlust durch Einfang im Moderator. Die Reaktionskette wird daher durch die unverlangsamten, schnellen Neutronen fortgepflanzt — ähnlich wie in der Atombombe. Natürlich bietet dann

auch die *Regelung* der Kettenreaktion größere Schwierigkeiten als bei Verwendung langsamer Neutronen, also einem „gewöhnlichen“ Reaktor; die Möglichkeit der Regelung beruht wieder auf der Existenz der *verzögerten* Neutronen (Seite 121). Daß die Verwendung der schnellen Neutronen keine Gefahr einer echten *Atomexplosion* bedingt, wird auf Seite 158 erklärt werden.

Der große Vorteil des „schnellen Reaktors“ liegt erstens in der günstigen *Neutronenbilanz*, die sich aus dem Fortfall der Absorption von Neutronen durch Uran 238 innerhalb des Reaktors sowie durch den Moderator ergibt. Zweitens lassen sich eben wegen des Fortfalles dieser Ballaststoffe Bau und Betrieb des Reaktors rationeller gestalten. Die überschüssigen Neutronen können durch Uran 238 oder Thorium *außerhalb* des Reaktors absorbiert werden, das heißt, es kann in raschem Tempo neuer Spaltstoff ausgebrütet werden, der dann seinerseits zum Bau neuer schneller Reaktoren dient, usw. Dadurch wächst die verfügbare Menge an konzentriertem Spaltstoff immer weiter an und man wird schließlich für manche Zwecke auf die Verwendung natürlichen Urans in Reaktoren überhaupt verzichten können.

Die *Kühlung* der schnellen Reaktoren muß wegen ihrer geringen Größe — also der großen Wärmeentwicklung pro Raumeinheit — besonders wirkungsvoll sein. Nur Kühlmittel kommen in Betracht, die ausgezeichnete Wärmeabfuhr gestatten, durch die hier besonders intensive Strahlung nicht angegriffen werden und keine leichten Atome enthalten, durch die die Neutronen verlangsamt würden: also z. B. *Natrium* oder *Quecksilber* (Seite 139). Ein brütendes Atomkraftwerk, das mit schnellen Neutronen arbeitet, soll in Dounreay, im einsamen Norden Schottlands, errichtet werden.

Nutzbare Wärme oder Sprengstoff?

Der schöne Plan, das verbrauchte Uran 235 durch das gebildete Plutonium zu ersetzen, ist nur ausführbar, wenn das Plutonium zur Gänze oder doch fast zur Gänze im Reaktor belassen wird;

praktisch heißt das, daß das Plutonium nach der Umlösung des Urans wieder in den Reaktor zurückgeführt wird. Wenn aber umgekehrt das Plutonium ständig auf Nimmerwiedersehen extrahiert wird, verschwindet ja der Spaltstoff Uran 235, ohne daß er durch den Spaltstoff Plutonium ersetzt wird. Der Reaktor verarmt also an Spaltstoff, und früher oder später kommt der traurige Tag, an dem der Reaktor den Dienst einstellt. Der Reproduktionsfaktor der Neutronen fällt unter den Wert 1. Das Uran — das natürlich noch immer eine gewisse Menge Uran 235 enthalten wird — muß dann verworfen werden; eine Anreicherung an Uran 235 nach einem der Verfahren zur Isotopentrennung wäre zu kostspielig.

Von einer gänzlichen Verwertung des Urans ist in diesem Falle gar keine Rede. Im Gegenteil, nur das Uran 235, also bloß $\frac{1}{140}$ der gesamten Uranmenge, ist überhaupt zur Kettenreaktion herangezogen worden, und auch davon konnte nur ein Teil tatsächlich verwertet werden. Es ist klar, daß sich damit alle Rentabilitätsberechnungen usw. ganz außerordentlich viel ungünstiger gestalten werden. Wer also Atombomben erzeugen und zu diesem Zweck Plutonium aus dem Kreislauf herausziehen will, tut dies auf Kosten der Nützlichkeit des Reaktors als Kraftwerk.

Man könnte nun einwenden: Das ist alles sehr bedauerlich, aber dann kann man doch wenigstens die Energie, die während der Erzeugung von Plutonium ohnehin entsteht — wenngleich sie nur einen winzigen Teil der gewinnbaren Energie ausmacht —, durch Erzeugung von elektrischem Strom nutzbar machen? Auch das trifft in der Praxis nicht zu. Zum Antrieb von Wärmekraftmaschinen braucht man nämlich Temperaturen, die ganz bedeutend über jener der Umgebung liegen. Zum Beispiel kann der ungeheure Wärmegehalt des Ozeans nicht nutzbar gemacht werden, da die Temperatur der Umgebung auch an kalten Tagen nicht hinreichend tief unterhalb der Temperatur des Meerwassers liegt. Daher findet kein Wärmeübergang „mit hinreichender Kraft“ statt. Rationelle Wärmekraftmaschinen können nur dort betrieben werden, wo die Temperaturdifferenzen mehrere hundert Grad ausmachen. In der gewöhnlichen Dampfmaschine besteht dieses Temperaturgefälle zwischen Feuerung und Kühlwasser.

Es würde also zur Nutzbarmachung der bei der Plutonium-erzeugung anfallenden Wärme nicht genügen, das Kühlmittel (Wasser) im Reaktor zum Sieden zu erhitzen und es bei 100 Grad Celsius in eine Wärmekraftmaschine (Dampfturbine) zu leiten. Voraussetzung ist vielmehr, daß das Kühlmittel bis auf einige hundert Grad erhitzt würde, das heißt, daß der Reaktor bei hohen Temperaturen in Betrieb stünde. Nun ist aber der Betrieb eines Reaktors bei hohen Temperaturen viel schwieriger als bei niedrigen Temperaturen. Vor allem müssen die Werkstoffe viel sorgfältiger vor Korrosion (die besonders durch das Kühlmittel bewirkt wird) geschützt werden. Die Werkstoffe müssen auch während des Betriebes dauernd überwacht werden. Korrodierende Wirkungen steigen ja bei jeder Temperaturerhöhung um hundert Grad auf das Vielfache an. Eine derartig sorgfältige Konstruktion des Reaktors wird sich nur dann lohnen, wenn in dem Reaktor im Laufe der Zeit das gesamte Uran — oder ein sehr großer Teil davon — tatsächlich zur Energieerzeugung verwendet wird.

Die Anlage lohnt sich aber gewiß nicht, wenn das Uran schon verworfen werden soll, sobald nur ein kleiner Bruchteil davon gespalten ist, sobald also eine möglichst große Menge Plutonium erzeugt und gewonnen worden und die entsprechende Menge Uran ²³⁵ verschwunden ist. Vom Standpunkt der Plutoniumerzeugung für Bomben besteht gar kein Anreiz, den Reaktor bei höheren Temperaturen laufen zu lassen. Die erzeugte Plutoniummenge hängt ja nur von der Gesamtzahl der im Reaktor erzeugten und verschluckten Neutronen ab, von denen ein nahezu konstanter Bruchteil die Bildung von Plutonium bewirkt. Eine solche *Plutoniumfabrik* ist aber ungleich einfacher, sicherer und billiger, wenn die Neutronen bei niedriger Temperatur ihr Werk tun. Man wird sich daher in einer Plutoniumfabrik nach Kräften bemühen, durch geeignete Maßnahmen die Temperatur möglichst niedrig zu halten. Man wird z. B. dem Reaktor möglichst große Dimensionen geben, damit sich die Wärme auf ein größeres Volumen verteilt, und vor allem wird man einen möglichst raschen Strom des Kühlmittels rücksichtslos durch die Kühlkanäle jagen.

Tatsächlich sind die Plutoniumfabriken nicht auf die Verwertung

der anfallenden Wärme eingerichtet. So wird für die enorme Plutoniumfabrik in Hanford im Staate Washington in der Nordwestecke der USA das Kühlwasser dem Columbiafluß entnommen, der sich durch die Reinheit seines Wassers auszeichnet. Man berechnet leicht, daß für je 100.000 kW und Stunde 10.000 Hektoliter Kühlwasser auf 100 Grad erhitzt werden müssen. Diese gewaltige Wärmemenge „dient“ lediglich der Erwärmung des Flusses und stellt somit eine völlig sinnlose Energievergeudung größten Ausmaßes dar. Auch in keiner sonstigen Plutoniumfabrik wird Wärme und dadurch Strom gewonnen. Die Praxis bestätigt daher durchaus, daß man sich bei dem Bau eines Werkes der Stufe III, also einer Produktionsanlage, entscheiden muß, ob man Atombomben erzeugen oder nutzbare Energie gewinnen will. „Man kann den Kuchen nicht sowohl *haben* als auch *essen*“, wie ein altes englisches Sprichwort sagt.

Das einzige *Atomkraftwerk* der Welt ist von der UdSSR Ende Juni 1954 in Betrieb genommen worden. Es befindet sich zwei Stunden südlich von Moskau, hat eine Wärmeleistung von 30.000 und eine elektrische Leistung von 5000 Kilowatt. Das Werk versorgt Industrie und Landwirtschaft der umliegenden Bezirke mit Energie; an der Projektierung und dem Bau von Großkraftwerken wird in der UdSSR gearbeitet. Ebendort wird ein Werk mit 100.000 Kilowatt elektrischer Leistung, wie auf der Genfer Atomenergiekonferenz 1955 mitgeteilt wurde, bereits im Jahre 1956 seine Tätigkeit aufnehmen. Dagegen will man in Großbritannien das erste Atomkraftwerk (Calder Hall) erst 1956, in den Vereinigten Staaten von Amerika das erste Werk (bei Pittsburg) gar erst 1957 in Betrieb nehmen.

Wohl aber existiert in den USA seit dem Herbst 1954 das Atom-U-Boot „Nautilus“ (18.000 kW). Dieses hat natürlich keinen nennenswerten Verbrauch an Brennstoff oder Luft, kann daher sehr lange tauchen. Zweifellos hat der Bau des Atom-U-Boot-Motors viel Scharfsinn und technisches Können erfordert. Ob es sich aber bei der Verwendung der Atomenergie zum Antrieb eines Kriegsschiffes um eine *Nutzbarmachung* der Atomenergie handelt, ist freilich eine Frage der Auffassung...

Der Bau von Atomkraftwerken

Es kommt also, wie dargelegt, für die Erzeugung nutzbarer Energie darauf an, das Kühlmittel im Reaktor auf *möglichst hohe Temperatur*, jedenfalls auf eine Temperatur von mehreren hundert Grad Celsius zu erhitzen. Das erhitzte Kühlmittel, das damit zum Arbeitsstoff wird, überträgt dann seine Energie auf eine Gas- oder Dampfturbine, die in üblicher Weise mit einem Generator (einer Dynamomaschine) gekoppelt ist. Durch diese wird elektrischer Strom erzeugt. Die Anlage zur Umwandlung der Wärmeenergie in elektrische Energie ist also nach ihrem Bauprinzip mit den z. B. in Kohlenkraftwerken existierenden Anlagen identisch. Lediglich die Hitze wird im Atomkraftwerk aus einer anderen Quelle geliefert.

Es ist deshalb in Atomkraftwerken ebenso wie in Kohlenkraftwerken ohne weiteres möglich, neben der Elektrizität noch nutzbare *Wärme* zu gewinnen. In diesen sogenannten *Fernheizkraftwerken*, die in großer Zahl in fortgeschrittenen Ländern, insbesondere in der UdSSR, bestehen, wird schon heute viel billiger Heißdampf erzeugt. Der Dampf kann unter einem Überdruck von z. B. einer Atmosphäre durch Rohrleitungen aus dem Kraftwerk abgeleitet werden und zur Heizung von Fabriken, Spitälern, Schulen oder auch Wohnvierteln dienen. Die Anlage solcher Fernheizanlagen erfordert natürlich weit-schauende Planung und kann daher am leichtesten im Rahmen der Planwirtschaft erfolgen. Um den Heizdampf zu gewinnen, entspannt man den ursprünglich unter Hochdruck stehenden Dampf in der Turbine nicht vollständig, wie das sonst geschieht, sondern eben nur bis zum gewünschten Niederdruck. Dadurch wird die gewinnbare elektrische Energie zwar ein wenig verringert, dafür aber eine sehr große Menge Wärme in nutzbarer Form erhalten, also bei einer Temperatur, die weit über die der Umgebung hinausgeht. Im Gegensatz dazu „dient“ im gewöhnlichen „Kondensationskraftwerk“, in dem man den Dampf soweit als möglich entspannt, dessen Wärme nur dazu, das Kühlwasser lau zu machen.

Verschiedene Arbeitsstoffe (Wärmeträger) sind für die Atomkraftwerke vorgeschlagen worden. Die Arbeitsstoffe müssen den auf Seite 125 genannten Bedingungen genügen. Außerdem aber muß man,

wenn das Kraftwerk wirtschaftlich arbeiten soll, dafür sorgen, daß der Arbeitsstoff aus dem Reaktor soviel Wärme als möglich in der Zeiteinheit herausholt. Da nämlich, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, der Hauptteil der Kosten der Atomenergie auf Verzinsung und Amortisation der Anlage — nicht aber auf den laufenden Verbrauch an Spaltstoff — entfällt, ist es entscheidend wichtig, daß jede Anlage möglichst hohe Leistung aufweist.

Als Kühlmittel kommen Gase oder Flüssigkeiten in Betracht. Mit *Gasen* läßt sich leicht arbeiten, doch ist ihre Fähigkeit zur Ableitung von Wärme unbefriedigend. Das kommt natürlich daher, daß Gase geringere Dichte haben und daher das Uran von weniger kühlender Materie umspült ist als bei Kühlung durch eine Flüssigkeit (siehe Seite 125). Doch soll z. B. in *Calder Hall* (Nordengland) vorläufig mit gasförmiger, unter 10 Atmosphären Druck stehender *Kohlensäure* gekühlt werden. Der Reaktor soll aus 50 Tonnen natürlichem Uran, 1000 Tonnen Graphit und außerdem einem Reflektor aus Graphit bestehen und von einer Stahlhülle umgeben sein, so daß auch bei Havarien keine (radioaktiv gewordene) Kohlensäure entweichen kann.

Eine geeignete *Flüssigkeit* ist das *Wasser*. Allerdings sind mit der Verwendung des Wassers gewisse Nachteile verbunden. Erstens ist Wasser bei höherer Temperatur chemisch aggressiv und korrodiert das Uran oder dessen Schutzhülle. Zweitens fängt der Wasserstoff Neutronen stark ein und verschlechtert daher durch seine Anwesenheit die Neutronenbilanz. Drittens können beim Sieden des Wassers, also bei der raschen Blasenbildung, Unregelmäßigkeiten im Neutronenhaushalt entstehen, indem die Neutronen natürlich im Dampf weniger leicht verschluckt werden als im dichteren Wasser.

Zur Vermeidung dieser Unregelmäßigkeiten hindert man in dem sowjetischen *Atomkraftwerk* das Wasser durch Druck überhaupt am Sieden. Dieses überhitzte „Primärwasser“ überträgt dann erst in einem *außerhalb* des Reaktors befindlichen Wärmeaustauscher seine Wärme auf stets neu zufließendes „Sekundärwasser“, das dabei in Dampf verwandelt wird. Das Primärwasser kehrt in geschlossenem Kreislauf in den Reaktor zurück, während der Sekundärampf die Turbine treibt. Der Kern des Kraftwerkes besteht aus

Graphit und 128 Rohren aus Uran, das auf 5% angereichert ist, und ist von rostfreiem Stahl umhüllt; die Temperaturen von Primär- und Sekundärwasser betragen 265 bzw. 190 Grad, die Temperatur des Graphits bis zu 700 Grad. Der Reaktor ist mit einem Reflektor aus Graphit und einem biologischen Schutzmantel aus 1 Meter Wasser und 3 Meter Beton versehen und ist in eine mit Helium oder Stickstoff gefüllte Stahlhülle eingeschlossen.

Der *Austauscher* besteht bloß aus einem Rohrschlängensystem ohne bewegliche Teile und erfordert daher keine besondere Pflege. Das ist insofern wichtig, als das Primärwasser stets stark radioaktiv wird, indem sich von den Reaktorwerkstoffen winzige Teilchen lösen, die durch das Wasser mitgeführt werden. Sie bleiben dann am Austauscher hängen und machen ihn radioaktiv, so daß seine Reparatur aus gesundheitlichen Gründen kaum möglich erscheint.

Für die Zukunft hat man allerdings auch Kraftwerke vorgesehen, in denen das Wasser zum *Sieden* erhitzt wird und der Primärdampf direkt die Turbine treibt. Dadurch wird zunächst die Konstruktion erleichtert, indem die Umhüllung weniger Druck ertragen muß und der Austauscher ganz fortfällt. Auch wird weniger Pumpleistung gefordert. Schließlich erweist sich die Wärmeabfuhr durch Sieden als äußerst wirkungsvoll; sie paßt sich auch mit erstaunlicher Geschwindigkeit Temperaturschwankungen an. Man hofft, daß der Dampf die Turbinenschaufeln nicht stark radioaktiv machen wird, denn die gelösten oder aufgeschwemmten aktiven Stoffe bleiben beim Sieden im flüssigen Wasser zurück.

Jedoch wird selbst das siedende Wasser in bezug auf die Wärmeableitung von einer Gruppe anderer Stoffe gewaltig übertroffen, nämlich von den *flüssigen Metallen*. Freilich kommt *Quecksilber*, an das man zuerst denkt — jedenfalls für die mit langsamen Neutronen arbeitenden Reaktoren — nicht in Betracht, weil es langsame Neutronen gierig verschluckt. Im Vordergrund des Interesses stehen augenblicklich das *Natrium* und eine Legierung von *Kalium* und *Natrium*. Die Verwendung dieser gefährlichen Stoffe stellt Neuland der Technik dar und erfordert besondere Studien.

Die Alkalimetalle sind nämlich chemisch äußerst *reaktionsfähig*. Sie oxydieren rasch an der Luft und fangen bei Berührung mit

Wasser sogar zu brennen an. Sie müssen also vor Wasser und Luft geschützt werden. Sie werden mit Hilfe sogenannter *elektromagnetischer Pumpen* in das System der Kühlrohre eingepreßt; diese Pumpen besitzen keine beweglichen Teile, bedürfen daher auch keiner Wartung, sondern sie setzen das flüssige Metall durch ein elektrisches Feld unmittelbar in Bewegung. Der Energieverbrauch solcher Pumpen, die bisher in der Technik nicht verwendet wurden, ist gar nicht übermäßig hoch. Selbstverständlich werden die Metalle durch einen geschlossenen Primärkreislauf geführt und übertragen ihre Wärme in einem Austauscher auf Wasser. Der Dampf treibt dann die Turbine. Man kann auch zwischen den primären Natriumkreislauf und den Wasserkreislauf einen sekundären Natriumkreislauf schalten, um sogar im Falle einer Katastrophe eine unmittelbare Berührung des primären, radioaktiven Natriums mit Wasser zu verhüten.

Äußerst vorteilhaft ist, daß im Primärkreis kein Hochdruck herrscht. Hoher Druck entwickelt sich nicht einmal bei sehr hoher Temperatur, da Natrium erst bei 882 Grad siedet. Die hohe Temperatur ist auch insofern zulässig, als Uran durch Natrium nicht angegriffen wird. Der Graphit muß freilich durch einen Zirkoniumüberzug geschützt werden. Die hohe Temperatur des Sekundärdampfes ermöglicht einen ausgezeichneten Wirkungsgrad des Turbinenbetriebes.

Der Hauptvorteil des Natriums liegt aber in seiner geradezu fabelhaften Fähigkeit zur Ableitung von Wärme. Man hofft, durch Verwendung von Natrium statt Wasser die Leistung des Reaktors auf das Zehnfache steigern zu können. Es wird schließlich vielleicht möglich sein, aus jeder Tonne Uran oder Plutonium 100.000 Kilowatt Leistung herauszuholen. Besonders wichtig ist die extreme Wärmeabfuhr bei den *schnellen Reaktoren*, da deren kritische Masse klein ist und sie daher nur wenig Spaltstoff enthalten. Allerdings kann man in allen Reaktoren den Spaltstoff zur Erleichterung der Wärmeabfuhr bis zu einem gewissen Grad durch Legieren mit Eisen, Chrom oder Aluminium „verdünnen“.

In letzter Zeit hat man auch Kraftwerke vorgeschlagen, in denen das Uran in zirkulierendem, flüssigem Metall, z. B. Wismut, gelöst ist.

Die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie

Sind die Rohstofflager hinreichend?

Gelegentlich wird in Zweifel gezogen, ob es genug Uran an der Erdoberfläche gibt, daß der Energiebedarf der Menschheit durch Spaltung von Uran gedeckt werden könne. Diese Besorgnis ist unbegründet. Rohstoffmangel kann die Umstellung auf Atomenergie nicht in Frage stellen.

Uran ist zwar keines der häufigsten, aber auch keines der seltensten Elemente. Nach den Daten der Geochemiker *W. J. Wernadsky*, *V. M. Goldschmidt* und anderer beträgt der mittlere Anteil des Urans an der Erdkruste einige Gramm pro Tonne. Es ist z. B. viermal häufiger als Antimon, achtmal häufiger als Quecksilber, 13mal häufiger als Jod und 800mal häufiger als Gold. In den obersten fünf Kilometern der Erdkruste dürften 50,,000.000.000.000 ($= 5 \times 10^{13}$) Tonnen Uran enthalten sein. Zur Deckung des gegenwärtigen Weltbedarfs an elektrischer Energie würden aber schon 200 Tonnen Uran jährlich genügen (siehe Seite 96). Thorium ist noch dreimal häufiger. Besonders anschaulich ist der Vergleich mit Blei. Blei ist einer der wichtigsten Werkstoffe. Die Weltproduktion an Blei betrug im Jahre 1954 fast 2 Millionen Tonnen. Dabei ist Blei nur sechsmal häufiger als Uran und zweimal häufiger als Thorium in der Erdkruste vertreten.

Natürlich zieht man zur bergmännischen Gewinnung Erze vor, in denen das Uran einigermaßen konzentriert ist. Grob gesprochen kann man rechnen, daß die Gesteinskosten jedes Metalls im umgekehrten Verhältnis zum Gehalt im Gestein ansteigen. Aber diese reicheren Uranerze sind gar nicht selten. Fast allmonatlich wird glaub-

würdig — noch öfter unglaublich — über die Entdeckung neuer Lagerstätten von Uran berichtet. Es besteht gar kein Zweifel, daß im Laufe der nächsten Zukunft die „greifbaren“ Uranerzlager sich vervielfachen werden. Dabei spielt die Vervollkommnung der Methoden zur Lagerstättenuche, die zumeist auf der radioaktiven Strahlenwirkung beruhen, eine große Rolle. Der individuelle „Prospektor“ sucht die Lager mit dem tragbaren *Geiger*-Zählrohr; kapitalkräftige Gruppen oder Staatsanstalten lassen das Gelände überfliegen und messen die Stärke der Strahlung vom Flugzeug aus.

Das wichtigste Uranerz ist die berühmte *Pechblende*, deren Fundstätten in Joachimsthal schon lange bekannt sind; es enthält theoretisch, das heißt als „chemisch reines“ Mineral der Formel U_3O_8 , 85% Uranelement. Auch die kanadischen Uranlager und die reichsten Uranlager, von denen wir wissen, die Lager im belgischen Kongo, bestehen aus Pechblende. Die Pechblende ist ein sogenanntes *primäres* Mineral und dürfte dadurch entstanden sein, daß uranhaltige Wässer durch Spalten und Klüfte aus der Tiefe hochgestiegen sind und dort ihr Uran abgelagert haben. Das Uran der Pechblende tritt daher oft in charakteristischen Bändern und Streifen auf und ist mit anderen Schwermetallen, z. B. Kobalt und Silber, vergesellschaftet. Die praktischen Urangelhalte der Pechblende- (und anderer) Erze liegen natürlich niedriger, als es der chemischen Formel des reinen Minerals entspricht, weil die Minerale mit „Gangart“, also taubem Gestein, vermischt sind (siehe *Tabelle VIII*). Die Pechblende verdankt ihren Namen ihrer schwarzen Farbe.

Tabelle VIII

Praktische Urangelhalte von Erzen, Gesteinen und Meerwasser

Erz	Gramm pro Tonne
Uranpechblende (Kongo, Kanada, Joachimsthal) .	10000 bis 50000
Carnotit (USA)	1000 bis 10000
Kolm (schwedischer Ölschiefer)	250
Granit	4
Meerwasser	0'0015

Sekundäre Erze sind die oft leuchtend gelbgrün gefärbten Minerale Carnotit, Tjuzamunit und Autunit, die z. B. die Lagerstätten auf dem Colorado-Plateau in den USA und in Sowjet-Mittelasien bilden und ebenfalls wirtschaftliche Bedeutung haben. Diese Minerale entstanden, indem die primären Lager später ausgelaugt wurden und die Uranlösungen an anderen Stellen von Bodenbestandteilen, mit denen sie stabile Verbindungen geben, gebunden wurden.

Für die relative *Billigkeit* des Urans ist es auch wichtig, daß dieses Element *chemische Eigenschaften* aufweist, die es in vieler Hinsicht charakteristisch von Begleitelementen unterscheiden, so daß es durch einfache chemische Operationen abgetrennt werden kann. Unter diesen Operationen spielen einfache Auflösungen und Ausfällungen mit Säuren und Laugen eine große Rolle. Die schließliche Reinigung bis zum höchsten Reinheitsgrad gelingt in ganz besonders einfacher Weise auf Grund der kennzeichnenden Eigenschaft des salpetersauren Urans (Urannitrats), in Äther löslich zu sein.

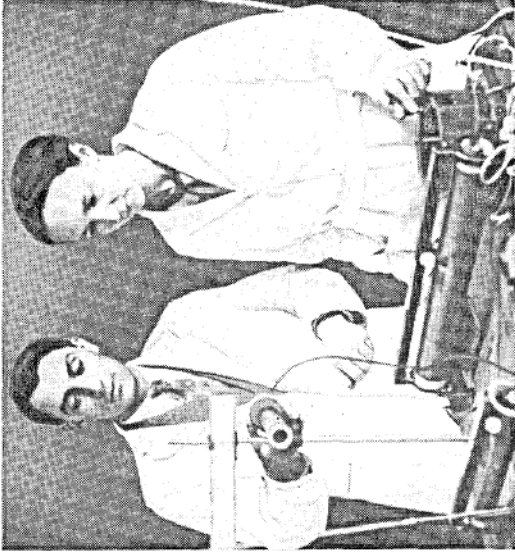
Die Gewinnung des *metallischen Urans* aus der gereinigten Uranverbindung erfolgt dadurch, daß man diese in das flußsaure Salz (Fluorid) überführt und ihm dann bei hoher Temperatur mit metallischem Kalzium oder Magnesium als Reduktionsmittel das Fluor entzieht. Während der Reduktion schmilzt das Metall und sammelt sich am Boden des Ofens als Block. Sein Schmelzpunkt beträgt 1133 Grad, seine Dichte 19·1; es gehört also zu den schwersten Metallen und ist um 68% schwerer als Blei. Das Uran hat günstige *mechanische Eigenschaften* und läßt sich leicht durch Schmieden, Gießen, Walzen, Strangpressen und Abdrehen auf die gewünschte Form bringen. Dagegen ist es gegen chemischen Angriff — schon durch Luftsauerstoff — recht empfindlich, weshalb es ja auch bei der Verwendung im Reaktor eine Schutzhaut benötigt.

(Bei dieser Gelegenheit sei kurz erwähnt, daß *Plutoniummetall* aus seinen Verbindungen nach ähnlichen Verfahren wie Uranmetall gewonnen wird. Das Metall ist noch schwerer als Uran [Dichte 19·8], schmilzt aber schon bei 637 Grad und erleidet bereits unterhalb des Schmelzpunktes mehrere Umwandlungen seiner Struktur, so daß sich seine Eigenschaften beim Erwärmen in komplizierter Weise verändern.)

Die verhältnismäßige Billigkeit des Urans sei durch ein Beispiel veranschaulicht. Die *Vereinigten Staaten* haben nur armes Uranerz. Andererseits bemüht sich die Regierung aus naheliegenden Gründen außerordentlich um die Erschließung der dortigen eigenen Lagerstätten. Um einen Anreiz zu ihrer Ausbeutung zu schaffen, wurde für das uranhaltige Material, das die Bergwerksbesitzer nach den gesetzlichen Bestimmungen der Regierung abliefern müssen, ein recht hoher Preis festgesetzt. Aber selbst dieser überhöhte Preis, der also an anderen Stellen der Welt ohne Zweifel bei weitem unterboten werden könnte, beläuft sich auf nur *acht Dollar pro Kilogramm*. Dieser Preis gilt unter der Voraussetzung, daß das Uran in Form von fast reinem Oxyd abgeliefert wird; andernfalls wird sogar noch ein entsprechender Abzug gemacht. Das ist also der Preis für eine Substanzmenge, bei deren Spaltung ebensoviel Wärme frei wird wie bei der Verbrennung von 2500 Tonnen Kohle; diese Kohlenmenge kostet aber im selben Lande 15.000 Dollar! Man erkennt, daß die Notwendigkeit der Ausbeutung ärmerer Lagerstätten und die entsprechende Verteuerung des Rohstoffes die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie nicht im mindesten bedrohen könnte. Der Rohstoffpreis bildet eben nur einen kleinen Teil des Gesteherungspreises der Atomenergie.

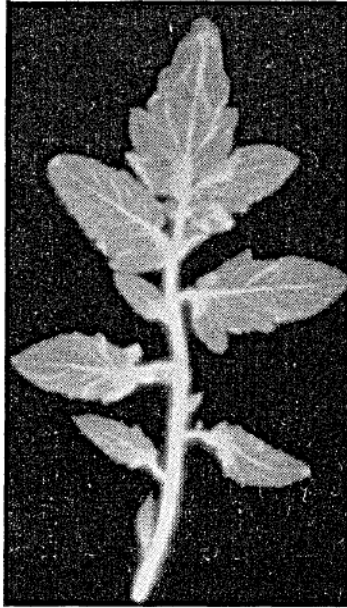
Tatsächlich hat man in den letzten Jahren in manchen Ländern auch die Ausbeutung sehr armer Lager in Angriff genommen. So verwendet man in *Schweden* den sogenannten *Kolm*, einen aus ozeanischen Ablagerungen organischen Ursprungs entstandenen Brennschiefer. Auch im Meere entstandene *Phosphatlager* können nennenswerten Gehalt an Uran aufweisen. In *Südafrika* werden neuerdings sehr beträchtliche Uranmengen gewonnen, indem man das *Golderz*, das man für die Zwecke der Goldgewinnung ohnehin in kostspieliger Weise fördern und mahlen muß, anschließend mit Säure auslaugt. In *Ungarn* soll der Urangehalt der Asche von Kohlen ausgenützt werden.

Die gesamte Jahresproduktion der Welt an Uran ist natürlich nicht bekannt, doch beträgt sie zweifellos viele tausend Tonnen, also ein Vielfaches der Uranmenge, die zur Deckung des Weltenergiebedarfes ausreichen würde.



Oben: Das Ehepaar *Frédéric* und *Irène Joliot-Curie* in seinem Laboratorium (1935)

Links: *Frédéric Joliot-Curie* heute



Verteilung von Radiophosphor in einem Teil einer Tomatenpflanze

Der Phosphor war in Lösung von der Pflanze aufgenommen worden. Die Pflanze wurde dann gegen eine Photoplatte gepreßt, wobei die radiophosphorhaltigen Teile die Platte schwärzten. Im Bild sind die aktiven Stellen hell, da es ein Positiv ist.

(Aufnahme Stout)



Verschiedene Verteilung von Radio-kalzium und von Radiophosphor über die Körper zweier Ratten

Jeder Ratte wurde eines der beiden Radioelemente mit dem Futter zugeführt. Sodann wurden die Tiere getötet, in flüssiger Luft steifgefroren und in der Mittelebene entzweigeschnitten. Je eine Hälfte der beiden Tiere wurde dann gegen die Photoplatte gepreßt. Das Kalzium findet sich fast ausschließlich in den Knochen (Bild rechts), während der Phosphor wenigstens zu einem Teil in andere Gewebe wandert (Bild links).

(Aufnahme Pecher)

Der Hauptteil des Urans der Erdoberfläche liegt allerdings in *feiner Verteilung* vor. Beispielsweise enthält Granit stets kleine Einsprengsel uranhaltiger Minerale. Der geringe Urangehalt des Granits der Zentralalpen verleiht diesem Gestein noch immer einen Energiegehalt, der den Energiegehalt eines gleich großen Volumens Steinkohle um das 15fache übertrifft. Das heißt: allein kraft ihres Urangehaltes sind die Zentralalpen — energetisch gesprochen — „so viel wert“ wie „Kohlenalpen“ vom 15fachen Volumen. Diesem feinverteilten Uran im Granit der Uralpen entstammen auch die radioaktiven Stoffe im Gasteiner Thermalwasser, ohne daß man in der Umgebung besondere Uranerzlager vermuten müßte.

Ausgedehnte *Thoriumlagerstätten* liegen in Form des *Monazitsandes* über hunderte Kilometer an den Küsten Brasiliens und Indiens. Der (schwere) Monazitsand ist dort so häufig, daß er einst als Schiffsballast verwendet wurde. Der Monazit ist bei der Verwitterung granitischer Gesteine übriggeblieben und durch die Flüsse in die See gewaschen worden, da er mechanisch und chemisch widerstandsfähig ist. Der Monazit enthält gewöhnlich einige Prozent an Thoriumelement. Das Metall wird nach einem ähnlichen Verfahren wie das metallische Uran gewonnen. Seine Dichte beträgt 11,7, sein Schmelzpunkt 1690 Grad, und es läßt sich ebenfalls gut mechanisch bearbeiten.

Theoretisch interessant ist, daß der *Erdkern* offenbar uran- und thoriumarm ist. Der Erdkern besteht wahrscheinlich hauptsächlich aus metallischem Eisen; metallisches Eisen nimmt aber aus chemischen Gründen nur wenig Uran oder Thorium auf. Darum blieben diese beiden Elemente in oxydierter Form in der Schlacke, die obenauf schwamm, sich bei der Abkühlung des Erdballs verfestigte und seinen Gesteinsmantel bildete. Auch beim Erstarren dieser Schlacke reicherten sich Uran und Thorium auf Grund der besonderen chemischen Eigenschaften ihrer Verbindungen hauptsächlich in den zuletzt kristallisierenden Schichten an der Oberfläche an*.

* Diese Vorstellungen wurden auf Grund der Theorie entwickelt, daß die Erde früher heißer war als heute und auch die Erdoberfläche flüssig war. Die Richtigkeit dieser Theorie wird derzeit von verschiedenen Wissenschaftlern, besonders von *O. J. Schmidt*, in Zweifel gezogen.

Derart sind Uran und Thorium zum allergrößten Teil in den obersten Schichten der Erdkruste verblieben. Zu der Annahme eines uranarmen Erdkerns und -mantels muß man auch aus einem anderen Grunde gelangen. Wenn nämlich der Uran- und der Thoriumgehalt des Erdinnern jenem der obersten Schichten der Erdkruste nahekäme, müßte die Erde viel mehr aus radioaktiven Prozessen stammende *Wärmeenergie* entwickeln und ausstrahlen, als tatsächlich der Fall ist. Folglich müssen die inneren Schichten der Erde, und zwar sowohl der metallische Kern als auch die Innenteile des Steinmantels, an radioaktiven Stoffen arm sein.

Diese Vorstellung wird in interessanter Weise durch die Analyse von *Meteoriten* bestätigt. Die Eisenmeteoriten (S. 69) erwiesen sich als äußerst uran- und thoriumarm, aber auch die Steinmeteoriten, die vermutlich zumeist den inneren Teilen des Steinmantels des zersprungenen Planeten entstammen, enthalten viel weniger Uran und Thorium als die uns zugängliche Außenschicht der Erde.

Die Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken

Es gibt derzeit (1955), wie erwähnt, in der ganzen Welt bloß ein einziges Atomkraftwerk, und auch dieses wurde erst im Vorjahr in Betrieb genommen. Endgültige Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken wird man natürlich erst machen können, wenn dieses Erstlingswerk und andere, größere Werke eine Weile gelaufen sein werden, so daß man über genügend praktische Erfahrungen verfügen wird. Dabei wird sich zweifellos mit zunehmender Entwicklung der Atomtechnik die Wirtschaftlichkeit der Anlagen verbessern. Diese Verbesserung wird in einem rascheren Tempo erfolgen, als dies in Zukunft etwa von Kohlen- oder Wasserkraftwerken erwartet werden kann. Die traditionellen Kraftwerke haben ja bereits einen hohen Grad der technischen Vollkommenheit erreicht.

Immerhin zeigen die Berechnungen der Technologen, daß schon beim heutigen Stand der Technik Atomkraftwerke unter bestimmten Bedingungen den *wirtschaftlichen Konkurrenzkampf mit den bisher*

üblichen Arten von Kraftwerken aufnehmen können. Natürlich muß man, um überhaupt solche Rechnungen ausführen zu können, ihnen ganz bestimmte Annahmen zugrunde legen. Eine wichtige Rechnungsgrundlage besteht darin, daß die Werke nur der Erzeugung von Energie dienen sollen, daß also nicht etwa Spaltstoff (Plutonium) während des Betriebes für andere (militärische) Zwecke abgezweigt wird. Daraus folgt, daß in einem solchen Kraftwerk auf Grund des beschriebenen Brutverfahrens das Uran zur Gänze oder zum großen Teil verarbeitet werden kann. (Eine Alternative wäre, daß das Plutonium verkauft und der Erlös berücksichtigt würde.)

Berechnungen der Wirtschaftlichkeit sind von den amerikanischen Technologen *Samuel Schurr* und *Jacob Marschak* in einer gründlichen Studie durchgeführt worden. Es sollen daher Ziffern dieser Studie entnommen werden. Die genannten Autoren vergleichen hauptsächlich den Preis des elektrischen Stromes, den sie für ein Atomkraftwerk von 75.000 Kilowatt errechnen, mit dem Strompreis aus einem ebenfalls nach dem letzten Wort unserer Technik zu errichtenden Kohlenkraftwerk der gleichen Leistung. Bei der Wiedergabe der Ziffern kommt es weniger auf ihre Höhe an, die ja doch derzeit noch auf Schätzungen beruht, als vielmehr auf den Hinweis, *wie* derartige Rechnungen überhaupt durchgeführt werden.

Zunächst wird gefunden, daß der *Preis des „Brennstoffs“*, also des Urans, zum Preis des Atomstroms praktisch gar nichts beiträgt. Das ergibt sich daraus, daß ein Kilogramm Uran so viel Energie liefert wie 2500 Tonnen Kohle, aber (in Form des Erzes) derzeit in den USA nur acht Dollar kostet (S. 144). Als Preis des reinen Uranmetalls wird 10 bis 100 Dollar pro Kilogramm angegeben. In dem sehr großen Unterschied zwischen Minimal- und Maximalpreis drückt sich einerseits aus, daß die Kosten der (an sich nicht besonders schwierigen) Gewinnung des Metalls aus dem Erz nicht bekannt sind, andererseits ist dabei auch ein großer Sicherheitsfaktor für den Fall eingeschlossen, daß sich die Verwendung sehr armer Erze als notwendig herausstellen sollte, was die Kosten der Gewinnung natürlich wesentlich erhöhen würde. Ob man aber als Uranpreis 10 oder 100 Dollar einsetzt, macht praktisch gar nichts aus, denn der daraus folgende reine Brennstoffpreis pro Kilowattstunde (kWh)

beträgt nur 0·0002 bis 0·002 Dollarcent. Wie sich gleich zeigen wird, ist das ein völlig zu vernachlässigender Betrag.*

Dagegen spielt natürlich der Ankaufspreis der Steinkohle für den Preis des Kohlenstromes eine wichtige Rolle. Auf Grundlage eines thermischen Wirkungsgrades des Kraftwerkes von 34%, was ungefähr das Beste ist, was die heutige Technik leisten kann, drückt sich ein Kohlenpreis von 6 bzw. 10 Dollar pro metrische Tonne (zu 7000 Kalorien pro Kilogramm) in einem Brennstoffanteil an den Gesteungskosten des Stromes von 0·21 bzw. 0·35 Cent pro kWh aus. Die Verschiedenheit der Kohlenkosten kommt natürlich zum Teil durch die Verschiedenheit der Produktivität der Bergwerke, zum anderen Teil durch die Verschiedenheit der Transportwege zustande.

Jedoch kann ein Vergleich zwischen den Gesteungskosten des Kohlenstromes und des Atomstromes natürlich nicht bloß auf Grund der Gesteungskosten von Kohle und Uran gezogen werden. Vielmehr muß die Größe der Investition für das Werk in beiden Fällen in Betracht gezogen werden, da die Kapitalsanlage verzinst und amortisiert werden muß. Schließlich gibt es auch, abgesehen von den Kosten für Brennstoff, solche für die Bedienung des Werkes.

Was nun die *Investition* betrifft, so läßt sich folgende Schätzung anstellen. Für jedes Kilowatt Leistung in einem modernen Steinkohlen-Großkraftwerk ist nach Angabe von *Schurr* und *Marschak* eine Investition von 130 Dollar notwendig. Zwei Drittel dieser Investition sollen auf Einrichtungen entfallen, die für Kohlen- und Atomkraftwerke identisch sind, also insbesondere die Turbinen und Dynamomaschinen. Das sind 90 Dollar. Das letzte Drittel, also 40 Dollar, entfällt auf die Dampfkesselanlagen des Kohlenkraftwerkes, die im Falle des Atomkraftwerkes durch den Uranreaktor samt Hilfsanlagen ersetzt werden müssen. Die Abschätzung der Kosten des Reaktors samt Hilfsanlagen stellt natürlich den gewagtesten Teil der ganzen Rechnung dar, doch glauben die Autoren, mit einer

* Zusatz bei der Korrektur: Auf der Genfer Atomenergiekonferenz 1955 wurde als Preis des natürlichen Urans (Metall) 40 Dollar pro kg, als Kapitalkosten wurden je nach Reaktortype 180—450 Dollar pro kW und als Atomstromkosten 0·4—1·0 Cent pro kWh angegeben.

Schätzung von 125 Dollar pro Kilowatt der Wahrheit am nächsten zu kommen. Insgesamt wäre also die Investition im Atomkraftwerk $90 + 125 = 215$ Dollar je Kilowatt gegen 130 Dollar im Kohlenkraftwerk. (Die bisher geplanten Werke sehen allerdings, wie dies für einen neuen Zweig der Technik verständlich ist, höhere Investitionen vor.)

Weiter wird angenommen, daß die Rate von *Verzinsung* und *Amortisation* sowohl beim Kohlen- als auch beim Atomkraftwerk 11% pro Jahr ausmachen soll, insgesamt also im ersteren Falle 14, im letzteren Falle 24 Dollar je Kilowatt. Um schließlich den Anteil der Amortisation und Verzinsung zu berechnen, der auf jede Kilowattstunde entfallen soll, muß noch eine Annahme darüber getroffen werden, wie viele Stunden im Jahr das Werk laufen soll. Offenbar ist die Belastung jeder Kilowattstunde durch Verzinsung und Amortisation um so kleiner, je mehr Kilowattstunden pro Jahr geliefert werden.

Bei Kohlenkraftwerken wird häufig eine jährliche Betriebsdauer von 4400 Stunden angenommen, was einer *50%igen Ausnützung der Kapazität* entspricht. Allerdings strebt man eine um so höhere Ausnützung der Kapazität an, je höher der Beitrag von Amortisation und Verzinsung zu den gesamten Gestehungskosten des Stromes ist. Daher wird man bei den Atomkraftwerken ganz besonders darauf hinarbeiten, sie womöglich ohne Unterbrechung laufen zu lassen. Wenn man also den Atomstrom in ein Verbundnetz einspeist, wird man zu Zeiten geringen Strombedarfes, also beispielsweise nach Mitternacht, eher die Kohlen- als die Uranwerke stilllegen. Dennoch soll vorsichtigerweise auch für die Uranwerke vorläufig nur eine *50%ige Kapazitätsausnützung* angenommen werden, weil anfangs noch Stillstände aus technischen Gründen vorkommen mögen. Doch muß sich die folgende Berechnung der Wirtschaftlichkeit weiter zugunsten der Atomkraftwerke verschieben, wenn einmal solche Stillstände vermieden werden können.

Auf der Grundlage der *50%igen Kapazitätsausnützung* ergibt sich nun das durch *Tabelle IX* vermittelte Bild.

Tatsächlich gilt nun ein *Kohlenpreis* von 6 Dollar nur für sehr günstige Verhältnisse. In den meisten Teilen der Welt liegt der

Tabelle IX

Stromkostenvergleich aus Atom- und Kohlenkraftwerk
(Dollarcents pro kWh Strom)

Beitrag	Atomwerk	Kohlenwerk mit Kohlenpreis (pro metrische Tonne)		
		6 Dollar	10 Dollar	15 Dollar
Brennstoff	0'0002 bis 0'002	0'21	0'35	0'52
Amortisation und Verzinsung	0'54	0'33	0'33	0'33
Betriebskosten außer Brennstoff	0'14	0'07	0'07	0'07
Gesamt	0'68	0'61	0'75	0'92

Kohlenpreis über 10 Dollar, z. B. in Westdeutschland und Frankreich um 12, in Großbritannien um 16, in Italien um 24 Dollar. Besonders hoch sind die Kohlen- und daher auch die Strompreise in Ländern, wo ein weiter Antransport nötig ist, beispielsweise in Südamerika und in Indien.

Der in den Vereinigten Staaten wirklich festgestellte Kohlenstrompreis liegt im Durchschnitt aller Werke bei 0'74, im Durchschnitt der in den letzten zehn Jahren errichteten Kraftwerke bei 0'56 Cent, doch kann der Preis im Einzelfall je nach den Umständen zwischen 0'3 und 1'2 Cent liegen.

Bei hohen Kohlenpreisen kann, wie man der Tabelle entnimmt, der Atomstrom schon beim jetzigen Stand der Technik mit dem Kohlenstrom konkurrieren. Freilich müßte man für genauere Berechnungen berücksichtigen, daß jedenfalls unter den heutigen Bedingungen Investition, Amortisation, Verzinsung und Betriebskosten weder beim Kohlen- noch beim Urkraftwerk vom Standort unabhängig sein können, daß man also die Ziffern der Tabelle nicht ohne weiteres auf andere Länder anwenden kann. Der Preis des Urans sollte allerdings unter keinen Umständen eine Rolle spielen.

Schwieriger als der Vergleich mit der Kohlenkraft ist offenbar der Vergleich mit der *Wasserkraft*. Bei Wasserkraftwerken spielen

zwar Betriebsstoffkosten gar keine und Bedienungskosten nur eine geringe Rolle. Dagegen sind die Amortisations- und Verzinsungskosten hoch und ändern sich in außerordentlichem Maße von Ort zu Ort. So ist der Wasserkraftstrom in Ländern wie Norwegen, wo sehr große Gefälle, und in Ländern wie Sibirien und Kanada, wo enorme Wassermengen zur Verfügung stehen, ausnehmend billig. Dagegen sind z. B. in den meisten Ländern Mitteleuropas die Stellen, wo der billigste Strom erzeugt werden kann, oft schon verbaut, und die verbleibenden Stellen sind weniger günstig. Man darf auf Grund einer Analyse der diesbezüglichen Ziffern sagen, daß der Wasserkraftstrom in manchen Ländern weit billiger bleibt als der Atomstrom, daß dies aber in anderen Ländern nicht der Fall ist.

Von Skeptikern wird gerne darauf hingewiesen, daß ein wesentlicher Teil der Stromkosten des Verbrauchers durch die Anlage- und Betriebskosten des weitverzweigten *Leitungsnetzes*, also durch die *Verteilung*, bedingt ist. Dieser Kostenanteil werde durch den Übergang zur Atomenergie nicht beeinflusst. Obwohl in dem Gedanken eine gewisse Wahrheit liegt, ist doch zu bemerken, daß auch die Verteilungskosten pro Kilowattstunde sinken müssen, wenn ein Netz vergrößert und besser ausgelastet wird. Gerade das aber wird in raschem Tempo eintreten, wenn billige Atomenergie verfügbar wird.

Jedenfalls ist zu bedenken, daß die Reserven an Wasserkraft wie auch die Brennstofflager begrenzt sind und nur in bestimmten Ländern bestehen. Dagegen können die Atomkraftwerke in unbegrenzter Zahl und überall errichtet werden.

Perspektiven der Nutzbarmachung der Atomenergie

Wir wollen nun einige Folgen diskutieren, die der großzügige Ausbau von Atomkraftwerken für die Weltwirtschaft und das Leben der Menschen haben kann.

Die erste Wirkung wäre infolge der Standortunabhängigkeit der Atomstromkosten eine *Dezentralisierung* der Weltwirtschaft. Am meisten haben die Länder zu gewinnen, die weder über Kohlen- oder

Öllager noch über genügende Wasserkräfte verfügen. Damit wird sich der enorme Unterschied in der Siedlungsdichte zwischen Gegenden wie dem Ruhrgebiet, Belgien, Lancashire, Pennsylvanien einerseits und fast unbevölkerten Gebieten andererseits allmählich ausgleichen können.

Zweitens werden *rückständige Länder*, die ein brennendes Interesse an der raschesten Entwicklung ihrer Energiequellen haben, den Vorsprung der hochentwickelten Länder rasch aufholen können, wenn die politischen und sozialen Voraussetzungen gegeben sind, insbesondere wenn ihnen die Möglichkeit gegeben wird, Investitionen zu machen, Uran zu erhalten und qualifizierte Arbeitskraft heranzubilden. Die Notwendigkeit einer solchen Entwicklung sei auf Grund einiger Angaben des hervorragenden indischen Physikers *Saha* illustriert. Dem Inder stehen heute nur 1½% jener Menge an mechanischer Energie zur Verfügung, die der Amerikaner verwendet. In Indien stammen noch 70% der verwendeten Energie aus tierischer und menschlicher Muskelkraft, in Amerika nur 4%.

Drittens wird sich in allen Ländern eine *Verbilligung* vieler Erzeugnisse oder Leistungen ergeben. Die Haushaltrechnung für Licht- und Kraftstrom kann herabgesetzt werden, die Tarife der elektrifizierten Verkehrsmittel können gesenkt werden, die Erzeugnisse der Metall- oder Textilindustrie können in dem Ausmaß verbilligt werden, als die Energiekomponente der Gesteungskosten sich verringert.

Viertens wird die Anwendung *bekannter technischer Prozesse* möglich werden, wo dies heute auf Grund hoher Energiekosten nicht möglich ist. Es wird daher die Elektrifizierung der Bahnen auch in Ländern erfolgen können, die keine Kohle und keine Wasserkraft haben. Bewässerungsprojekte, deren Durchführung bisher an den Kosten des Stromes zum Betrieb der Pumpen gescheitert ist, werden verwirklicht werden können. Steppen und Wüsten, die häufig guten Boden und warmes Klima aufweisen, werden durch das belebende Wasser nutzbar gemacht werden.

Fünftens werden sich *neue technische Verfahren* durchsetzen können, die bisher an den Energiekosten gänzlich oder doch unter den allermeisten Umständen scheitern. Als ein Beispiel sei die Gewinn-

nung von Roheisen durch Elektrizität genannt, die bisher nur in höchst bescheidenem Maßstab an wenigen Stellen der Welt erfolgt. Nach diesem „Elektorroheisen“-Verfahren wird der koksbeheizte Hochofen durch einen elektrisch beheizten „Niederschachtofen“ ersetzt. Zwar braucht auch der Niederschachtofen Kohlenstoff als chemisches Reduktionsmittel (um dem Eisenerz den Sauerstoff zu entziehen) sowie zur Kohlhung des Roheisens. Aber erstens wird *weniger* Kohlenstoff benötigt und zweitens muß man ihn nicht in Form des teuren *Hochofenkokes* verwenden. Darüber hinaus ist auch vorgeschlagen worden, den Kohlenstoff sogar als Reduktionsmittel durch *Wasserstoff* zu ersetzen, der elektrolytisch erzeugt werden kann, wenn Strom sehr billig ist.

Sechstens wird die großzügige Anwendung der *Fernheizung* die billige Heizung der Städte und von Glashäusern zur Lebensmittel-erzeugung, ja zur Blumenzucht, ermöglichen. Sie wird daher das Leben in kalten Zonen der Erde leichter und freudvoller gestalten.

Siebtens wird die Zahl der Arbeiter in den *Kohlengruben* relativ (im Verhältnis zur Gesamtzahl der Arbeiter) oder sogar absolut herabgesetzt werden können. Damit wird die Zahl der Menschen vermindert, die einen großen Teil ihres Lebens bei einer anstrengenden und gefährlichen Arbeit ferne dem Licht des Tages zubringen müssen.

Achtens wird die *Rauch-* und *Rußplage* leichter bekämpft werden können.

Atomenergie für Fahrzeuge?

Bezeichnenderweise sind in USA solche Projekte zur Strom-erzeugung aus Uran am weitesten fortgeschritten, die sowohl technisch als auch wirtschaftlich besonders schwierig sind. Das sind Projekte zum Antrieb von Fahr- und Flugzeugen. Offenbar finden *Flugzeuge* und *Schiffe*, besonders U-Boote, die praktisch keinen Brennstoff-bedarf und überhaupt keinen Sauerstoffbedarf aufweisen, bedeutendes militärisches Interesse. Andererseits ist der Bau geeigneter Atommotoren besonders schwierig und teuer. Die Konstruktion muß

sehr leicht und kompakt ausgeführt sein. Alle Arbeitsstoffe müssen im Kreislauf bleiben. Das Problem des Strahlenschutzes etwa in dem beschränkten Raum eines Flugzeugs oder U-Boots ist akut. Dennoch ist das erste U-Boot („Nautilus“) schon in Betrieb genommen, und an der Planung von Atomkraft-Flugzeugen wird mit Nachdruck gearbeitet. Im Wettbewerb zwischen Atombombe und Atomkraft hat in Amerika die letztere nur dort gesiegt, wo sie militärische Verwendung verspricht, also wo sie auch einen Bestandteil einer Atomwaffe bildet. Dabei hat der „Nautilus“ die Kleinigkeit von 55 Millionen Dollar gekostet! An Atommotoren für *Handelsschiffe* wird z. B. in Norwegen gearbeitet, wo man zwar über reichliche Wasserkraft, aber über keinen Brennstoff verfügt.

Der Antrieb von *Kraftwagen* mit Atomenergie ist wegen der Strahlung kaum möglich. Auf einem Kraftwagen lassen sich schwerlich Strahlenschutzwände unterbringen. Wohl aber kann natürlich die Herstellung der Werkstoffe für den Bau und der Treibstoffe für den Betrieb der Kraftwagen durch Einsatz von Atomstrom verbilligt werden, so daß sich die Atomenergie indirekt auch hier auswirken wird.

Auch mit Atomkraft-*Lokomotiven* ist auf absehbare Zeit nicht zu rechnen. Es liegt näher, die Lokomotiven durch Atomstrom zu betreiben, der durch ortsfeste Zentralen geliefert wird. Atomkraft-Lokomotiven würden so schwer sein, daß man den Unterbau der Bahnlinien, die Brücken usw. gewaltig verstärken müßte. Vielleicht würde die Einführung der Atomenergie zum direkten Antrieb von Lokomotiven, wenn sie sich dennoch durchsetzt, zu einer radikalen Abänderung der *Grundlagen* des *Eisenbahnwesens* führen, indem man Größe, Fassungskraft und Geschwindigkeit der Züge auf ein Vielfaches erhöht. Zweifellos würde eine solche Entwicklung besonders für den Langstreckenverkehr Vorteile bringen.

Ob die *Raumschiffahrt* aus der Atomenergie unmittelbaren Vorteil ziehen kann, bleibt angesichts des Gewichtes der Atommotoren und der Strahlenschutzwände vorläufig ebenfalls zweifelhaft. Auch benötigt man für den Raketenantrieb bekanntlich nicht nur eine *Energiequelle*, sondern auch einen *Arbeitsstoff*, der ständig ausgestoßen wird und dadurch den erforderlichen Rückstoß liefert.

Die Atombombe

Die Kettenreaktion mit prompten schnellen Neutronen

Es ist schon hervorgehoben worden (Seite 120), daß ein mit langsamen Neutronen betriebener Reaktor auf keinen Fall besonders heftig explodieren kann. Dies liegt letzten Endes daran, daß die Geschwindigkeit der langsamen Neutronen nur etwa 2 Kilometer pro Sekunde beträgt, die Kettenreaktion sich also sicher nicht in sehr raschem Tempo fortpflanzen kann. Eine wirklich verheerende Explosion kann aus diesem Grunde nicht einmal dann eintreten, wenn die Reaktionskette durch die *prompten* Neutronen allein — ohne Mitwirkung der *verzögerten* Neutronen, also der Nachzügler (siehe Seite 121) — weitergetragen wird.

Bei der *Atombombe* legt man es dagegen darauf an, daß die Kettenreaktion sich, sobald sie einmal begonnen hat, mit möglichst großer Geschwindigkeit fortpflanzt und ausbreitet. Dazu ist erstens natürlich notwendig, sich lediglich auf die *prompten* Neutronen zu stützen und auf die Wirkung der *verzögerten* Neutronen zu verzichten. Es muß also schon der Reproduktionsfaktor der prompten Neutronen allein den Wert eins überschreiten. Zweitens sollen die Neutronen im wesentlichen *unverlangsamt* zum Einsatz kommen. Auf Seite 157 wird gezeigt werden, daß freilich die Erfüllung dieser beiden Bedingungen für die echte Atomexplosion nicht genügt; sonst würde ja ein *schneller Reaktor* (Seite 133), der aus Versehen „prompt kritisch geht“, sich in eine Atombombe verwandeln!

Die Neutronen sollen also annähernd die Geschwindigkeit behalten, mit der sie bei der Kernspaltung geboren werden — im Mittel 15.000 Kilometer pro Sekunde. Diese Neutronen leben in der Bombe nur etwa

$\frac{1}{1.000.000.000}$ (10^{-9}) Sekunde, während sie in dem mit langsamen Neutronen betriebenen Reaktor immerhin einige Tausendstel einer Sekunde leben. Die Dauer einer Neutronengeneration ist also in der Bombe millionenmal kleiner als im langsamen Reaktor. Die Bombe enthält — wie der schnelle Reaktor — keinen Moderator, sie besteht vielmehr aus reinem Spaltstoff. Welcher Spaltstoff ist geeignet?

In reinem natürlichem Uran ist eine Kernkettenreaktion überhaupt nicht möglich. Wie auf Seite 110ff. erläutert wurde, gehen in diesem Material zu viele Neutronen durch Reaktionen mit Uran 238 verloren, die mit der Kernspaltung konkurrieren. Für die Atombombe kommt daher nur Spaltstoff in Betracht, der das Uran 238 an Spaltbarkeit übertrifft, also Uran 235, Plutonium 239 oder Uran 233. Das Uran 235 muß durch Isotopentrennung aus natürlichem Uran abgeschieden werden, während Plutonium 239 und Uran 233, wie schon dargelegt wurde, beim Betrieb von Reaktoren gebildet werden. Die drei Spaltstoffe verhalten sich untereinander so ähnlich, daß es genügen wird, wenn wir einfach von einer *Uranbombe* sprechen — ob nun die Bombe aus Uran oder aus Plutonium besteht.

Unter gewissen Umständen kann Atomsprengstoff mit *friedlicher Zielsetzung* benützt werden. Sowjetische Quellen berichteten 1949, daß Atomsprengstoff in Sibirien dazu benützt wird, eine Wasserscheide zu beseitigen, die die heute ungenützt ins Eismeer fließenden Ströme Ob und Jenissei daran hindert, ihre Fluten dem trockenen Mittelasien zuzuführen. Die Fruchtbarmachung der Wüsten Mittelasiens kann Millionen Menschen neue Siedlungsgebiete erschließen. Doch ist bisher die friedliche Verwendung des Atomsprengstoffs gegenüber seiner militärischen Verwendung in den Hintergrund getreten.

Bau und Verwendung der Uranbombe

Auch in einer Uran- (oder Plutonium-) Bombe, wie in einem enthemmten Reaktor, fliegt die reagierende Masse während der Reaktion rasch auseinander. Daher wird auch hier die Reaktion unterbrochen, ehe noch die ganze Masse reagiert hat. Jedoch können sich wegen

der großen Geschwindigkeit der Neutronen viele Generationen entwickeln, bevor die Masse zerstoben ist. Die Masse steht der rapid sich vergrößernden Neutronendichte gewissermaßen zu träge gegenüber. Man vermutet, daß auf diese Weise immerhin einige Prozent des Spaltstoffes der Bombe zur Reaktion kommen; der Rest verdampft ungespalten. Wenn dann die verdampften Spaltprodukte und der ungespaltene Sprengstoff sich mit einer großen Masse kalter Luft mischen, gehen sie zumeist wieder in den festen Zustand, also in die Form feinen *Staubes*, über.

Um die Zerstörung der Bombe möglichst lange hinauszuzögern, wird sie mit einem *Mantel* umgeben, durch den die Sprengladung verdämmt wird. Außerdem entfaltet der Mantel auch Reflektorstreuung und wirft einen Teil der entweichenden Neutronen in die Bombe zurück. Auf diese Weise kann die kritische Masse der Bombe herabgesetzt und Spaltstoff erspart werden.

Bei Atombomben gibt es nämlich ebenso wie bei Reaktoren und aus dem gleichen Grunde eine *kritische Masse* (siehe Seite 116). Wenn das Volumen der Bombe zu klein ist, so entweichen zu viele Neutronen (in diesem Falle schnelle Neutronen) durch die Oberfläche und kommen daher nicht zur Geltung. Wenn also nicht nur der „Reproduktionsfaktor im unendlich großen System“, k_{∞} , sondern auch der tatsächliche Reproduktionsfaktor k größer als 1 sein soll, so muß die kritische Masse überschritten werden.

Bei vorgegebenem innerem Aufbau kann deshalb eine Atombombe auf gar keinen Fall und mit keinem Mittel zur Explosion gebracht werden, solange die kritische Größe nicht erreicht wird. Umgekehrt explodiert eine Atombombe unaufhaltsam sofort, wenn die kritische Größe erreicht ist. Die *Zündung* erfolgt auch hier, wie beim Reaktor, automatisch durch Neutronen aus der kosmischen Höhenstrahlung oder aus der spontanen Kernspaltung. Eine Bombe der kritischen Größe wiegt einige Kilogramm. Man bedenke, daß 1 kg Uran nur einem Würfel von weniger als vier Zentimeter Kantenlänge entspricht!

Eine wirksame Atomexplosion kann nicht hervorgebracht werden, indem man zwei unter-kritische Stücke Spaltstoff, die *zusammen* die kritische Masse überschreiten, *allmählich* in Berührung bringt. In diesem Falle würde eine schwache Explosion schon in dem Augen-

blick erfolgen, in dem die kritische Masse in einem sehr geringen Maße effektiv überschritten ist. Die beiden Teile würden durch diese schwache Explosion schnell auseinandergetrieben werden, so daß die Explosion nicht zu voller Entfaltung kommen könnte. Die kritische Größe muß vielmehr *plötzlich* und *reichlich* überschritten werden, damit eine wirksame Explosion eintreten kann. Die Bombe muß also bereits in dem Augenblick voll explosionsfähig sein, in dem das erste Neutron auf sie einwirkt und die Kettenreaktion auslöst. Eine Möglichkeit zur plötzlichen Herstellung der Explosionsfähigkeit besteht darin, die beiden Teile der Bombe durch eine gewöhnliche *chemische Sprengladung*, etwa durch Schießbaumwolle, gegeneinanderzuschießen. Jedenfalls wiegt der Mechanismus der Bombe mehr als diese selbst (*Abb. 24*).

(Weil in ihm die kritische Masse *niemals plötzlich und reichlich* überschritten wird, wird auch ein schneller Reaktor bei Unglücksfällen niemals zur Atombombe!)

Aus der Tatsache, daß eine Bombe, die die kritische Größe nicht erreicht, überhaupt nicht explodiert, ergibt sich die Unmöglichkeit der Herstellung von Bomben mit *beschränkter Sprengwirkung* — vorausgesetzt, daß man die Wirksamkeit nicht durch absichtlich „schlechte“ Konstruktion herabsetzt und dabei Sprengstoff vergeudet. Man kann also keine Probeexplosion mit *geringen Mengen* Sprengstoff veranstalten. Bei normaler Ausnützung des Sprengstoffes ist die Wirkung kolossal, sobald *überhaupt* Explosion eintritt.

Offenbar kann die Atombombe somit nur der Vernichtung großer Objekte und besonders von Städten dienen. Die Atombombe ist ihrem Wesen nach eine *Waffe der Massenvernichtung*. Dies gilt auch für die sogenannten taktischen Atombomben. Der verheerenden Wirkung der Bombe fallen unterschiedslos Militär und Zivilbevölkerung, Männer, Frauen und Kinder zum Opfer.

Uran 235 wird derzeit um 25.000 Dollar pro kg angeboten (siehe Seite 130). Der gesamte Sprengstoff einer Bombe kostet daher bloß einige hunderttausend Dollar. Die Kosten der Atombombe liegen auch (auf gleiche Wirkung berechnet) weit niedriger als die Kosten konventioneller (chemischer) Bomben. Die Atomwaffe ist also eine „billige“ Waffe.

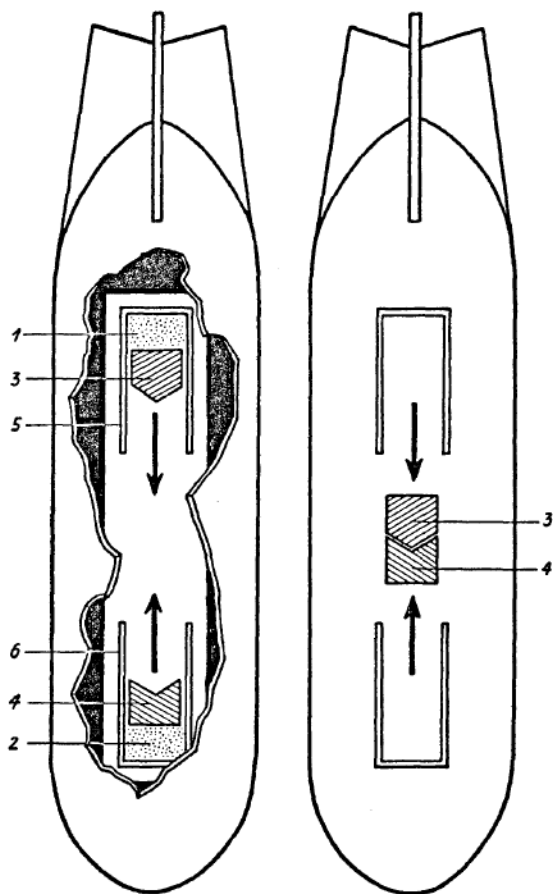


Abb. 24

Prinzip der Uran-Atombombe.

Links: Einrichtung der Bombe (schematisch)

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| 1... Pulverladung I; | 4... Uranmasse II; |
| 2... Pulverladung II; | 5... Abschubrohr I; |
| 3... Uranmasse I; | 6... Abschubrohr II. |

Rechts: Unmittelbar vor der Atomexplosion

- 3, 4... Vereinigung der beiden gegeneinander abgeschossenen Uranmassen I und II zur „kritischen Masse“, wodurch die augenblicklich ablaufende Kettenreaktion ausgelöst wird

Die Wirkung der Uranbombe

In *Hiroshima* wurde die Zahl der Todesopfer ursprünglich offiziell mit 86.000 angegeben. Doch ist seither eine weitere große Zahl von Einwohnern an den Spätfolgen der Explosion zugrunde gegangen. Der offizielle Japanische Wissenschaftliche Rat stellte im Jahre 1954 fest, daß in *Hiroshima* und *Nagasaki* zusammen eine Dreithemillion Menschen umgekommen sind. Etwa zur gleichen Zeit gab Präsident *Eisenhower* bekannt, daß die Sprengkraft der neuesten Uranbomben die der Bombe von Hiroshima um das 25fache übertrifft.

Jene Bombe wurde eines „schönen“ Augustmorgens des Jahres 1945, ohne daß die Bevölkerung der unglücklichen Stadt irgendeine Warnung erhalten hätte, auf Hiroshima abgeworfen, das vor der Katastrophe etwa 300.000 Einwohner zählte. Da der Angriff nur durch ein einzelnes Flugzeug erfolgte, war nicht einmal Alarm gegeben worden. Daher erreichte die Explosion die Arbeiter und Angestellten in Betrieb und Büro, die Hausfrauen in der Wohnung und beim Einkauf, die Kinder beim Spiel in den Straßen und Parks. Die *Explosionsenergie* der Bombe betrug nicht weniger als 23 Millionen Kilowattstunden — freigesetzt in einigen Millionsteln einer Sekunde. Diese Energie entspricht dem gesamten Stromverbrauch einer modernen industriellen Millionstadt während einer vollen Woche! Die Atomexplosion vernichtete menschliches Leben in dreierlei Weise, nämlich durch die Sprengwirkung, die Glutstrahlenwirkung und die radioaktive Strahlenwirkung. Der Wirkungsbereich der Uranbombe von Hiroshima ist in *Abb. 25* dargestellt (siehe auch die *Bildtafeln* bei Seite 208 und bei Seite 209).

Die *Sprengwirkung* der Bombe von Hiroshima kam der von 20.000 Tonnen *Trotyl* (TNT) gleich. Trotyl ist der sonst zum Füllen von Bomben und Granaten gebräuchliche chemische Sprengstoff. Seine Sprengkraft entspricht ungefähr der des wohlbekannten *Dynamits*. Bomben von 1 Tonne Gehalt an Trotyl gehörten im letzten Krieg schon zu den allergrößten; sie wurden nur gegen besonders wichtige massive Objekte eingesetzt. Um die Sprengwirkung auf ein Maximum zu erhöhen, ließ man die Bombe in Hiroshima nicht durch Aufschlag auf den Erdboden, sondern beim Erreichen einer Höhe

von 600 Metern explodieren. Da sie auf einem Fallschirm niederschwebte, konnte sich das Flugzeug inzwischen in Sicherheit bringen.

Durch die Explosion wurde eine gewaltige *Druckwelle* erzeugt, die in weitem Umkreis die Menschen unmittelbar tötete oder schwer



Abb. 25

Wirkungsbereich der Atombombe von Hiroshima vom 6. August 1945

verletzte. Auch die Bauten der Stadt wurden zum Einsturz gebracht. Eisenbeton schwerer Bauart wurde im Mittel etwa bis auf 600 Meter, Ziegelbauten wurden bis auf 1500 Meter gänzlich zerstört. (Alle Entfernungsangaben vom Bodenpunkt unter dem Explosionsort.) Alles Fensterglas wurde bis auf vier Kilometer zerschmettert, leichter Schaden an Häusern erstreckte sich bis auf 13 Kilometer. Die ein-

stürzenden Mauern begruben zahllose Leichen und schwerverletzte Menschen unter sich. In der Nähe der Bombe entsprach die Druckwelle einem *Orkan* von 1500 Kilometer Stundengeschwindigkeit. Ihre Geschwindigkeit übertraf also die des Schalls.

Zudem ging von der explodierenden Bombe ein gewaltiger Stoß *Hitzestrahlung* aus, der Strahlung eines glühenden Ofens oder der Sonne vergleichbar, nur eben unvergleichlich stärker. Während die Temperatur der sichtbaren Sonnenoberfläche „nur“ 6000 Grad beträgt, erreichte die explodierende Bombe etwa eine Million Grad. Selbst auf eine Entfernung von 10 Kilometern erschien der Lichtschein der explodierenden Bombe noch 100mal heller als die Sonnenscheibe. Die Glutstrahlung behält nicht lange ihre große Stärke, nämlich nur einige Sekunden; allmählich vermischt sich der Glutball mit Luft und kühlt sich dabei ab. Doch genügen bereits die ersten Sekunden, um eine Stadt in Brand zu setzen und eine große Zahl von Menschen zu verbrennen.

Brennbares Material, wie Papier oder Holz, ging auf weite Entfernung, etwa bis auf 2 km, in Flammen auf. Telegraphenmaste wurden bis auf 3·5 km oberflächlich verkohlt. Da die Flammen nicht gelöscht wurden, vereinigten sie sich zu einer riesenhaften Feuersbrunst. Die heiße Luft stieg auf und kalte Luft strömte nach, so daß sich ein *Feuersturm* ergab, der die Flammen weiter anfachte. Die Glutstrahlung während der Explosion war so heftig, daß selbst Dachziegel bis auf 600 Meter Entfernung oberflächlich geschmolzen wurden und sich mit einer Art Lavaschicht bedeckten, die Blasen enthielt.

Wo *Menschen* unmittelbar von der *Glutstrahlung* getroffen wurden, also nicht durch Mauern oder dergleichen gegen sie geschützt waren, wurden sie je nach der Entfernung verkohlt oder versengt. Die Brandwirkungen erstreckten sich über den ganzen Körper, waren aber an unbedeckten Teilen besonders heftig. Bekleidete Teile zeigten häufig Muster, da die Strahlung an den dunkleren Stellen stärker absorbiert wurde. So fand sich das Muster kariertes Hemden oder geblumter Kleider in der Haut der Opfer wieder. Leichte Verbrennungen wurden bis auf eine Entfernung von drei Kilometern beobachtet. Übrigens hängt der Wirkungsradius der Glutstrahlung

von der Klarheit der Luft ab. Man hat auch Versuche angestellt, die Glutstrahlung durch künstlichen Nebel oder Rauch wenigstens teilweise abzufangen.

Während Verletzungen durch Spreng- und Hitzewirkung auch sonst in Kriegen vorkamen, sind Kriegsverletzungen durch *radioaktive Strahlenwirkung* etwas völlig Neuartiges. Ihre Heftigkeit läßt sich aus folgendem Vergleich veranschaulichen. Spitäler besitzen Radium zur Krebsbehandlung, weil die Gammastrahlen das Krebsgewebe abtöten. Für die Behandlung eines Patienten genügen sehr kleine Mengen — Bruchteile eines Gramms Radium. Wenige Spitäler haben mehr als ein Gramm. Das Radium wird zum Schutz des Personals durch ferngelenkte Geräte in Position gebracht, und wenn es gerade nicht gebraucht wird, liegt es hinter einem Bleipanzer. Man konnte nun zeigen, daß die Spaltprodukte, die sich bei der Explosion von Hiroshima bildeten, anfänglich eine Menge von radioaktiver Strahlung abgaben, die der von mehreren Millionen Tonnen Radium entspricht!

Nach der Explosion sinkt die Strahlungsintensität allmählich ab, und zwar einerseits deshalb, weil kurzlebige Spaltprodukte absterben, andererseits auch deshalb, weil die Spaltprodukte durch den heißen Luftstrom hinweggerissen werden. Dennoch reichte in Hiroshima die Strahlengarbe aus, noch in einer Entfernung von mehreren Kilometern Todesfälle zu bewirken. In einer Entfernung von 1300 Metern starb bereits die Hälfte der Betroffenen an der radioaktiven Strahlenwirkung allein, selbst wenn sie sonst unverletzt geblieben waren.

In Hiroshima wurde keine starke radioaktive „*Verseuchung*“ des Erdbodens oder der Gebäuderümmen durch Spaltprodukte bewirkt, weil die Bombe in der Luft explodierte und Luftströme die radioaktiven Stoffe hinwegführten. Dagegen ist eine langandauernde Verseuchung zu befürchten, wenn eine Atombombe durch Aufschlag auf den Boden gezündet wird. Dann könnte unter Umständen das betroffene Gelände lange Zeit hindurch überhaupt nicht betreten werden. Auch um das *Atoll Bikini*, wo die Amerikaner am 25. Juli 1946 eine Uranbombe *unter Wasser* explodieren ließen (siehe *Bildtafel* bei Seite 192), nahm der Ozean bis auf große Entfernung starke

und langdauernde Radioaktivität auf. Man stelle sich die Folgen einer Explosion schon einer Uranbombe in einem Hafenbecken vor!

Die radioaktive Verseuchung wirkt sich erstens insofern aus, als dann im Verlaufe langer Zeit die Menschen immer wieder *von außen* durch Strahlung getroffen werden. Zweitens werden die radioaktiven Stoffe als Staub *eingeschnitten* und mit der Nahrung und dem Trinkwasser *verschluckt*. Die *radioaktiven Gifte* lagern sich dann je nach ihrer chemischen Natur in dem einen oder anderen Organ ab und entfalten dort an Ort und Stelle ihre zerstörenden Wirkungen. Beispielsweise geht radioaktives *Kalzium* in den Kalk der Knochen, radioaktives *Jod* ebenso wie gewöhnliches Jod in die Schilddrüse. Unter Umständen — vorausgesetzt auch, daß die Halbwertszeit hinreicht — bleiben die abgelagerten Stoffe in den Organen durch Jahrzehnte wirksam.

Die *biologischen Wirkungen* der radioaktiven Strahlung sind um so unheimlicher, als wir sie nicht fühlen. Auch Menschen, die die mehrfache tödliche Dosis erhalten, spüren im Augenblick der Bestrahlung gar nichts. Erst nach Stunden stellen sich die ersten Beschwerden, wie Erbrechen, Durchfall, Fieber, ein. Der Tod erfolgt in den schlimmsten Fällen nach Tagen, oft aber auch nach Wochen, Monaten oder sogar Jahren schrecklichen Siechtums. (Beispielsweise fühlte der kanadische Physiker *Slotin*, der sich in einem Versuchslaboratorium versehentlich der vielfachen tödlichen Dosis von Strahlen aussetzte, *während* der Bestrahlung überhaupt nichts; nach einigen Tagen starb er trotz allerbesten Pflege.)

Die *Schädigungen durch die Strahlung* sind vielfacher Art, sind aber meistens dadurch bedingt, daß biologisch aktives, also wachsendes Gewebe leicht abgetötet wird. (Das ist auch der Grund für die oft besonders hohe Strahlenempfindlichkeit von Krebsgewebe.) Beispielsweise tritt Haarausfall ein, weil die Haarwurzeln zugrunde gehen. Die Geschlechtszellen und die embryonalen Zellen sind sehr empfindlich. So wurde in Hiroshima oft Sterilität beobachtet. Schwangere Frauen hatten vielfach Fehlgeburten, gingen dabei auch oft selbst zugrunde, und viele Kinder, die nicht normal entwickelt waren, kamen zur Welt. Nach den Untersuchungen einer Wissen-

schaftergruppe in Nagasaki brachten von strahlengeschädigten schwangeren Frauen 23% tote Kinder zur Welt, 26% der Kinder starben als Säuglinge und 25% blieben geistig zurück.

Die meisten Opfer der Strahlung von Hiroshima starben aber an der Zerstörung des blutbildenden Gewebes im *Knochenmark*. Die Zahl ihrer Blutkörperchen nahm ab, sie verfielen der Anämie. Die verminderte Leistungsfähigkeit des Blutes bewirkte Unfähigkeit zur normalen Verdauung und jähe Abnahme der Widerstandsfähigkeit auch gegenüber leichten Infektionen, z. B. gegenüber Grippe. Ausgedehnte Blutungen wurden beobachtet.

Zu den Spätwirkungen der Bestrahlung gehören vermehrte Häufigkeit von *Krebs*, besonders von Leukämie, und Erblindung durch *grauen Star* (Linsentrübung). Leider ist damit zu rechnen, daß sogar die künftigen Generationen, noch ehe sie geboren sind, durch die Strahlen geschädigt sein werden. Selbst nach Jahrtausenden werden lebensuntüchtige, kranke Kinder scheinbar gesunder Eltern zur Welt kommen, weil ihre Ureltern in Hiroshima den Strahlen der amerikanischen Atombombe ausgesetzt worden waren. Nach dem gegenwärtigen Stand des Wissens ist die Schädigung der Erbanlagen auf keine Weise rückgängig zu machen.

(Versuche an Mäusen haben ergeben, daß je nach dem Stadium der Keimesentwicklung jene Organe des Embryos am schwersten geschädigt werden, die sich gerade in lebhafter Entwicklung befinden. Es gibt Stadien, in denen die Einwirkung einer hinreichenden Dosis von Röntgen- oder Gammastrahlung arge Mißbildungen an jedem einzelnen Embryo erzeugt; das ist bei Mäusen die Zeit vom 6. bis zum 12. Tag bei einer Gesamtträchtigkeitsdauer von 19 Tagen. *Aus ähnlichen Gründen ist auch beim Menschen die Röntgenuntersuchung von Schwangeren wenn irgend möglich zu vermeiden.*)

Hilfeleistung ist nur begrenzt möglich. Sie ist um so schwerer, als ja die ganze von einer Atombombenexplosion betroffene Stadt gelähmt ist. Es gibt kein Wasser, keinen Strom, kein Gas, keine Verkehrsmittel, keine Feuerwehr, keine Ärzte, keine Spitäler. Selbst Hilfsmannschaften von auswärts können sich nur langsam den Weg durch die Trümmer bahnen. So kommt es, daß die Zahl der Todesopfer viel größer ist, als der Schädigung der isolierten Individuen entsprechen

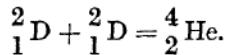
würde. Man hat geschätzt, daß allein für *Bluttransfusionen* an die Bewohner von Hiroshima *hunderttausende Blutspender* erforderlich gewesen wären — und zudem alle nahezu *gleichzeitig*. Noch ärger wäre die Katastrophe im Falle ausgedehnter radioaktiver Verseuchung der Trümmerstätte, wovon in der Folge noch gesprochen werden soll.

Bau und Verwendung der Wasserstoffbombe

Um die Jahreswende 1949/50, also nach der Erprobung der ersten sowjetischen Atombomben, hat der Chef der amerikanischen Regierung deren Beschluß bekanntgemacht, *Wasserstoffbomben* (H-Bomben) herzustellen. Allerdings hat die Welt seither durch das Protokoll über das Verhör *Oppenheimers*, des früheren Leiters der amerikanischen Atombombenforschung, erfahren, daß Arbeiten über die Wasserstoffbombe tatsächlich schon viele Jahre vorher aufgenommen worden waren.

Auf Seite 97 wurden jene *thermonuklearen Reaktionen* gestreift, die in einer energieliefernden Synthese von leichten Atomkernen bestehen. Thermonukleare Reaktionen erfordern die Annäherung mehrerer Atomkerne aneinander. Da jedoch die Kerne kraft ihrer positiven Ladungen einander abstoßen, müssen sie von vornherein mit außerordentlicher Bewegungsenergie begabt sein, um einander hinreichend nahe kommen zu können. Solche Bewegungsenergie besitzen die Atomkerne aber erst bei Temperaturen von einer Million Grad oder mehr.

Die in *Tabelle VI* (Seite 95) angeführte thermonukleare Reaktion (Aufbau von Helium aus Wasserstoff) stellt die Reaktion dar, von der unsere Sonne „lebt“. Für die militärische Anwendung in einer Wasserstoffbombe ist *diese* Reaktion kaum geeignet. Sie erfordert ja, wie man unmittelbar erkennt, die Verbindung von nicht weniger als vier positiv geladenen Kernen miteinander. Jedesmal steht die elektrische Abstoßung hindernd im Wege. Von diesem Standpunkt aus geeigneter wäre z. B. die Reaktion zweier *Deuteronen* (Deuteriumkerne, also der Kerne des schweren Wasserstoffs) miteinander:



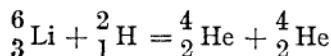
Diese Reaktion erfordert die Annäherung von nur zwei (ebenfalls einfach elektrisch geladenen) Atomkernen aneinander, verläuft daher verhältnismäßig leicht. Eine Wasserstoffbombe könnte deshalb z. B. im wesentlichen aus einer Masse an Deuterium bestehen. Es kommen aber auch andere „Aufbaureaktionen“ aus leichten Atomkernen in Betracht, z. B. die Reaktion von Deuteronen mit Tritium- oder mit Lithiumkernen. Alle diese Reaktionen liefern je Gewichtseinheit ein Vielfaches der Energie, die bei der Kernspaltung des Urans oder des Plutoniums freigesetzt wird. Da in jedem Falle Kerne des (schweren) Wasserstoffs beteiligt sind, kann man auch immer von einer *Wasserstoffbombe* sprechen. Das Tritium selbst muß, da es kurzlebig ist, ebenso wie Plutonium in Reaktoren künstlich hergestellt werden und beansprucht dabei einen großen Teil der verfügbaren Neutronen. Ursprünglich schien es, als sei das Tritium für Wasserstoffbomben unentbehrlich, doch kann man heute offenbar Bomben bauen, die wenig oder gar kein Tritium enthalten. Ein großer „Fortschritt“!

Da die thermonuklearen Reaktionen erst bei überaus hoher Temperatur verlaufen, muß die Wasserstoffbombe künstlich „gezündet“ werden, damit die Kettenreaktion in Gang kommen kann. Die Zündung kann praktisch nur durch die Explosion einer Uran- oder Plutoniumbombe erfolgen, bei der ja eine Temperatur von einer Million Grad entsteht. Die Wasserstoffbombe muß daher eine Uran- oder Plutoniumbombe eingebaut enthalten. Was der „Brennstoff“ der Wasserstoffbombe selbst ist, ist nicht mit Sicherheit bekannt. Es ist nirgends offiziell veröffentlicht worden, *welche* Reaktion der Deuteronen für die Explosion ausgenützt wird.

Ein schwieriges Problem bei der Verwendung des Deuteriums besteht darin, daß es ebenso wie der leichte Wasserstoff ein *Gas* ist, also normalerweise ein sehr großes Volumen beansprucht. Es wird behauptet, daß man aus diesem Grunde das Deuterium, wenn man es in elementarer Form für die Wasserstoffbombe verwenden will, durch Anwendung tiefer Temperatur verflüssigen muß. Erst dann ist es genügend konzentriert, um explodieren zu können. Unter keinen Umständen verflüssigt sich nun das Deuterium oberhalb minus 240 Grad

Celsius; man muß es also auf mindestens diese Temperatur, das heißt auf eine Temperatur von nur 33 Grad oberhalb des absoluten Nullpunktes, abkühlen und bis zum Augenblick der Explosion auf dieser Temperatur erhalten. Selbst bei dieser Temperatur muß man noch zusätzlich hohen Druck anwenden, um das Deuterium flüssig zu erhalten. Der „Eiskasten“ für das Deuterium ist aber so groß und schwer, daß er kaum in einer Bombe oder Granate untergebracht werden kann. Wenn man also elementares Deuterium verwendet, muß man praktisch ein ganzes Laboratorium zuerst aufbauen und dann in die Luft sprengen! Eine Ende 1952 im Eniwetok-Atoll zur Explosion gebrachte Vorrichtung soll 65 Tonnen gewogen haben.

Allerdings ist es offenbar möglich, die Kühlung zu ersparen, wenn man das *Deuterium chemisch bindet*, wobei ein fester Stoff entsteht. Darüber schreibt der berühmte englische Physiker *P.M.S. Blackett*, daß es der Sowjetunion als erstem Land gelungen sei, das Deuterium in chemischer Bindung an das Metall Lithium zur Kettenreaktion zu bringen. Die Verbindung, das „Lithiumdeuterid“, ist eine salzartige, weiße, gegen Wasser empfindliche Substanz, die natürlich pro Raumeinheit ziemlich viel Deuterium enthält. Sie kann ganz einfach ohne Verwendung von Druck oder Kühlung in dicht schließenden Behältern aufbewahrt werden. Das verwendete Lithium soll nur aus dem einen der beiden natürlich vorkommenden Isotope bestehen und selbst an der Kernreaktion teilnehmen:



Derart wurde das Problem der H-Bombe 1953 technisch gelöst.

Der „Vorteil“ der Wasserstoffbombe besteht nicht nur darin, daß man Uran spart und das Rohmaterial aus jedem Wassertümpel beziehen kann. Viel wichtiger ist, daß Wasserstoffbomben *keine kritische Größe* kennen. Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei der Uranbombe kann eine beliebig große Wasserstoffbombe *niemals von selbst losgehen*, da sie ja Zündung durch Hitze braucht. Erst wenn man den Uranzünder betätigt, erfolgt Detonation. Während also die Stärke von Uranbomben einer Begrenzung unterworfen ist, gilt dies für die Wasserstoffbombe nicht. Man kann beliebig große und starke Wasserstoffbomben bauen und aufbewahren. So wurde

glaubwürdig gemeldet, daß die H-Bombe, die am 1. März 1954 im Stillen Ozean zur Explosion gebracht wurde und die japanischen Fischer zum Teil tödlich verletzte, die 600—800fache Sprengkraft der Bombe von Hiroshima besaß, also 12—16 Millionen Tonnen Trotyl entsprach. Es besteht kein technisches Hindernis, die Stärke der H-Bomben noch weiter zu steigern.

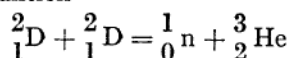
Die Wirkung der Wasserstoffbombe

Der Wirkungsradius der Wasserstoffbombe hängt von ihrer Stärke ab. Man hat berechnet, daß der *Sprengradius* mit der Kubikwurzel der Sprengkraft zunimmt. Wenn wir zum Zweck der Überlegung die Explosion einer „Normal“-Wasserstoffbombe betrachten, die etwa die tausendfache Sprengkraft der Bombe von Hiroshima hat, also 20 Millionen Tonnen Trotyl entspricht, so wird ihr *Sprengradius* das Zehnfache des Sprengradius von Hiroshima betragen. Ziegelbauten würden also auf 15 Kilometer zerstört, Glasscheiben auf 40 km Entfernung zertrümmert werden. Der Radius der *Glutstrahlenwirkung* jedoch wird mit der Quadratwurzel der Bombenstärke zunehmen, also für die genannte Normalwasserstoffbombe 30mal größer sein als in Hiroshima. Die Glutstrahlen würden also auf 60 km Entfernung Holz in Brand setzen und Menschen verbrennen. Schon durch die Spreng- und Glutwirkung würde eine Wasserstoffbombe eine Weltstadt samt dem ganzen umliegenden Siedlungsgebiet vernichten. Auf die Frage eines Reporters meinte der amerikanische Bevollmächtigte für den Luftschutz, *Peterson*, daß man bei der Explosion einer solchen Bombe *in einer Entfernung von 25 Kilometern unter günstigen Umständen vielleicht eine Chance hätte, mit dem Leben davonzukommen.* (Die *Bildtafel* bei Seite 193 zeigt den bei der Explosion einer Wasserstoffbombe entstehenden gigantischen Explosionswolkenpilz.)

Betrachten wir schließlich die *radioaktive Strahlenwirkung* der H-Bombe! Die im Augenblick der Explosion auftretende „direkte“ Gammastrahlung kann, so stark sie auch ist, doch nur über einen

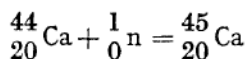
Radius wirken, der den entsprechenden Radius von Hiroshima nur mäßig übertrifft. Das kommt daher, daß die Gammastrahlung beim Durchgang durch Luft allmählich verschluckt wird. Dennoch kann die H-Bombe *indirekt* auf folgende Weise enorme Strahlenwirkung entfalten.

Eine Uran- oder Plutoniumbombe wiegt wenige Kilogramm, wovon höchstens ein Zehntel wirklich zur Explosion kommt. Aus einem Kilogramm Uran oder Plutonium entstehen aber bei der Spaltung nur etwa zehn Gramm Neutronen (durchschnittlich 2·5 Neutronen mit der Masse 1 aus jedem gespaltenen Atomkern mit der Masse 235 oder 239). Dagegen können aus einer Wasserstoffbombe mit dem Gewicht von einer Tonne — wovon wieder ein Zehntel wirklich ausgenützt werden möge — mehrere Kilogramm Neutronen sozusagen als Nebenprodukt durch verschiedene Kernreaktionen, beispielsweise die Reaktion



entstehen. (Zur Fortpflanzung der Reaktionskette selbst dienen in der Wasserstoffbombe, wie oben angeführt, die Neutronen nicht.)

Die Wasserstoffbombe erzeugt also bei der Explosion erstens eine Reihe radioaktiver Spaltprodukte, die aus dem Zünder stammen. Zweitens aber können durch die vielen Neutronen Atome der Umgebung aktiviert werden, indem diese Atome die Neutronen unter Bildung radioaktiver Isotope verschlucken. Beispielsweise wurde nach der amerikanischen Explosion vom 1. März 1954 betaaktives Radio-kalzium beobachtet, das bei der Einwirkung von Neutronen auf den Kalk der Südseeinseln nach der Reaktion



erzeugt und gleich verdampft wurde. Ein anderes Element, das sich leicht stark aktivieren läßt, ist das Natrium, das als Kochsalz im Meerwasser vorliegt. Bei der Explosion einer Wasserstoffbombe unter der Meeresoberfläche ist mit der Entstehung gewaltiger Mengen Radionatrium zu rechnen. Die Halbwertszeit des Kalziums beträgt 6 Monate, die des Natriums 15 Stunden. Die dritte Quelle radioaktiver Verseuchung wird im folgenden Abschnitt besprochen.

Kobaltbombe — Radioaktive Gifte als Waffen

In Amerika ist wiederholt vorgeschlagen worden, für besondere Kriegszwecke planmäßig radioaktive Verseuchung hervorzurufen. Beispielsweise hat, wie wir aus den Tagebüchern des Kriegsministers *Forrestal* wissen, der bekannte Physiker *E.O. Lawrence* vorgeschlagen, die enormen Mengen an Uranspaltprodukten, die ständig in den Uranreaktoren anfallen, für militärische Zwecke, also zur Vergiftung der „gegnerischen“ Bevölkerung zu verwenden.

Den Zwecken einer solchen Kriegführung könnte aber auch besonders die Wasserstoffbombe äußerst wirksam dienen. Man kann nämlich dafür sorgen, daß die Neutronen möglichst zahlreich von einem Element eingefangen werden, das dann mit guter Ausbeute und über einen längeren Zeitraum tödliche Strahlung abgibt. Als solches Element empfiehlt sich, wie amerikanische Fachleute gefunden haben, das eisenähnliche Metall *Kobalt*. Radiokobalt mit der Halbwertszeit von 5·3 Jahren wird ja in bescheidener Menge auch als Strahlenquelle für Krebstherapie und industrielle Radiographie verwendet. Es wurde also angeregt, die Wasserstoffbombe mit einem Mantel aus Kobaltmetall zu umgeben. Das entstandene Radiokobalt verdampft sofort, kondensiert sich aber bei der Abkühlung durch Luft wieder zu winzigen Schwebeteilchen, die dann durch den Wind verbreitet werden können.

Nach den letzten Enthüllungen von Wissenschaftern soll es sich bei der schon mehrfach genannten Bombe von Bikini (1. März 1954) zwar nicht um eine Kobaltbombe, aber doch um eine Bombe gehandelt haben, die besonders der Erzeugung radioaktiver „Asche“ dient. Diese Bombe war ebenso wie eine Kobaltbombe besonders darauf eingerichtet, ein Maximum an Radioaktivität zu entwickeln. Man vermutet, daß die Wasserstoffbombe mit einem *Mantel aus Uran 238* umgeben war. Dieser Stoff fällt bei der Abtrennung des Isotops Uran 235 aus natürlichem Uran und auch beim Betrieb von Uranreaktoren nach Erschöpfung des Uran 235 ab.

Das Uran 238 wird durch die aus der Wasserstoffbombe kommenden schnellen Neutronen, die es ähnlich wie Kobalt verschluckt, gespalten. Wenn das Uran 238 auch für sich allein, wie betont

wurde (Seite 112), nicht den Reproduktionsfaktor 1 erreicht, also selbständig die Kettenreaktion nicht aufrechterhalten kann, so wird doch beim Auftreffen der enormen Zahl der Neutronen eine sehr große Menge Uran umgesetzt, und es entsteht eine entsprechende Menge an radioaktivem Gift. Der Amerikaner *Lapp* hat berechnet, daß die anfängliche Radioaktivität der explodierten Bombe der *einer Milliarde Tonnen Radium* entsprochen hat. Außerdem trägt das Uran natürlich auch sehr wesentlich zur Sprengkraft der Wasserstoffbombe bei.

Besonders wirksam wird die *radioaktive Asche*, wenn die Explosion so nahe dem Erdboden erfolgt, daß der Glutball den Boden berührt. Dann verdampft eine große Menge Gestein und Erdreich und mischt sich mit der ebenfalls zunächst dampfförmigen Asche. Dies war in Bikini der Fall. Der Kalk des Atolls wurde verdampft und schlug sich nach Vermischung mit kälteren Luftmassen gemeinsam mit den Spaltprodukten nieder. Wegen der Anwesenheit der verhältnismäßig großen Mengen Kalk bildeten die Spaltprodukte nicht — wie das etwa in Hiroshima der Fall gewesen war — einen äußerst feinen Staub, der so lange schweben bleibt, bis ein Großteil der Radioaktivität schon abgeklungen ist, und sich erst allmählich über einer sehr großen Fläche absetzt. Vielmehr bildeten sich bei der Abkühlung des Dampfes *größere* Teilchen aus, die sich in der Hauptsache schon nach einigen Stunden absetzten und das betroffene, *kleinere* Gebiet natürlich um so stärker radioaktiv verseuchten.

Der Wind blies die radioaktiven Gifte von Bikini aus bevorzugt in eine bestimmte Richtung über das Meer. Die Zone stärkster Radioaktivität hatte ungefähr elliptische Gestalt. Auf Grund der Messungen mit selbstregistrierenden Geräten hat man die Gebiete verschieden starker Strahlungswirkung abgesteckt. Es ergab sich, daß das Gebiet, innerhalb dessen ein Mensch schon während der ersten 36 Stunden eine solche Strahlendosis empfängt, daß er daran wahrscheinlich zugrunde geht, 20.000 Quadratkilometer umfaßte, also der halben Fläche der Schweiz entsprach. Die größte Entfernung, auf die sich die *wahrscheinlich tödliche* Wirkung erstreckte, betrug 270 Kilometer — die Entfernung Wien-Salzburg oder Berlin-Hamburg. Sehr viel größer war natürlich das Gebiet, innerhalb dessen

Menschen die Bestrahlung zwar wahrscheinlich überleben würden, in dem sie aber doch dauernde gesundheitliche Schäden davontragen würden.

Am stärksten betroffen wurde die Mannschaft des japanischen Fischerbootes „Glücklicher Drachen“, das sich außerhalb der Sperrzone in 120 Kilometer Entfernung von Bikini befand. Einige Stunden nach der Explosion ging auf dem Schiff Kalkstaub wie Schnee nieder. Da die Fischer die Gefahr nicht kannten, ergriffen sie keine besonderen Maßregeln. Nach einigen Tagen erkrankten sie und werden vermutlich auf Lebenszeit krank bleiben. Der Funker *Kuboyama* ist bereits an Leberschaden zugrunde gegangen. Bei der Obduktion fand sich in der Leber eine große Menge an Radioelementen, die er als Staub eingeatmet oder durch Speise und Trank zu sich genommen hatte. Auch die Einwohner benachbarter Inseln erkrankten lebensgefährlich. Daß der „Versuch“ von Bikini nicht unmittelbar mehr Opfer gekostet hat, ist nur darauf zurückzuführen, daß er in der endlosen Wasserwüste des Stillen Ozeans ausgeführt wurde. Übrigens erhebt sich natürlich die völkerrechtliche Frage, wie weit eine Macht große Teile des Meeres für Versuche mit Massenvernichtungswaffen beanspruchen und sie samt den dortigen Inseln radioaktiv verseuchen darf.

Geradezu unabsehbar groß war das Gebiet, in dem alle Lebewesen stark radioaktiv wurden, indem sie Spaltprodukte speicherten. In Japan mußten zahlreiche Schiffsladungen Fisch vernichtet werden. Dies geschah freilich erst, nachdem schon viele Familien *radioaktiven Fisch* gegessen hatten. Monatelang gingen dann in den Häfen Japans die Techniker mit *Geiger-Zählrohren* von Schiff zu Schiff, um die Fische zu prüfen. Da man natürlich nichts Gewisses darüber weiß, welcher Betrag an Radioaktivität im Fisch gesundheitsschädlich ist, mußten zur Sicherheit auch Fänge vernichtet werden, die verhältnismäßig geringe Radioaktivität zeigten. Willkürlich wurden solche Ladungen vernichtet, die auf 10 Zentimeter Entfernung die natürliche Anzeige des Zählrohrs (also den Leerwert, siehe Seite 66) auf das Vierfache erhöhten. Öfters war freilich die Anzeige 500mal höher als der Leerwert! Der Schaden Japans ist sehr groß, denn die Japaner decken den Hauptteil ihres Bedarfes

an tierischem Eiweiß durch den Fischfang. Die radioaktiv gewordenen Schiffe mußten oft durch Abschleifen der Wände, Behandlung mit dem Sandstrahlgebläse usw. entgiftet werden.

Zu den biologisch gefährlichsten Spaltprodukten gehört das *Radiojod* (Halbwertszeit 8 Tage), das in der Schilddrüse gespeichert wird und diese allmählich durch seine Strahlung zerstört (siehe Seite 223). Ebenfalls besonders gefährlich ist das *Radiostrontium* (zwei Isotope, mit Halbwertszeiten von 54 Tagen bzw. 20 Jahren); da Strontium dem Kalzium chemisch ähnlich ist, lagert es sich im Kalk der Pflanzen und Tiere ab und kann daher die Nahrung auf Jahrzehnte hinaus vergiften. Auf gleiche Gewichte gerechnet, ist die Giftigkeit der radioaktiven Stoffe zumeist enorm viel größer als die der sonst bekannten (chemischen) Gifte. So ist das Radium schon etwa 1000mal giftiger, das Radiokobalt eine Million mal giftiger, das Radiojod 100 Millionen mal giftiger als z. B. das *Strychnin*.

Der radioaktive Staub wird durch den Wind allmählich um die ganze Erde geblasen und kann dann überall mühelos mit *Geiger-Zählrohren* nachgewiesen werden. Regengüsse waschen einen Teil des Staubes aus der Luft aus, so daß das Regenwasser sich als radioaktiv erweist. Japanische Forscher haben berechnet, daß im Laufe des Jahres 1954 über Japan radioaktive Stoffe der Gesamtstärke von 100.000 Curie (entsprechend 100 kg Radium) niedergegangen sind. Manche Fachleute stehen auf dem Standpunkt, daß schon diese aus den Versuchen stammende Aktivität gesundheitsschädliche Wirkungen entfalten kann. So wurde die japanische Bevölkerung angewiesen, Regenwasser vor dem Trinken und Kochen zu filtrieren.

Das Auftreten des radioaktiven Staubes dient natürlich auch dem *Nachweis von Atomexplosionen* in fernen Ländern. Aus der Natur des Staubes lassen sich manche Schlüsse auf die Art der verwendeten Bombe ziehen. Auch kann man der durchschnittlichen Halbwertszeit der Aktivität entnehmen, *wieviel Zeit* seit der Explosion vergangen ist. Je mehr Zeit verstrichen ist, desto mehr herrschen relativ langlebige Spaltprodukte vor, die noch nicht abgeklungen sind. Natürlich muß man bei solchen Untersuchungen die *radioaktive Asche* von den ebenfalls in der Luft schwebenden Zerfallsprodukten des radioaktiven Gases *Emanation* unterscheiden,

welches vom Radium der Erdkruste „ausgehaucht“ wird. Die Unterscheidung gelingt leicht auf Grund der Verschiedenheit der Halbwertszeit; die Zerfallsprodukte der Emanation klingen rascher ab als die Asche des Urans. Auch unterscheiden sich die Spaltprodukte chemisch von den natürlichen radioaktiven Stoffen.

Die Frage des Atomwaffenverbots

Keineswegs soll behauptet werden, daß ein *technischer Schutz* gegen Atomwaffen unmöglich sei. Wenn auch nahe dem Ort einer Explosion kaum jemand sie überleben kann, so können in größerer Entfernung doch Schutzmaßnahmen getroffen werden. Mauern schützen gegen die Glutstrahlung und bis zu einem gewissen Grad auch gegen die radioaktive Strahlung. Relativ guten Schutz bietet insbesondere das Eingraben in den Erdboden. Auch wird man die Möglichkeit der Berührung mit radioaktiven Giften verringern können, indem man sich peinlich sauber hält, die Aufnahme von giftigem Staub mit Speise und Trank vermeidet und Baulichkeiten mit einem Wasserstrahl abschwenmt.

Dessenungeachtet ist klar, daß der Atomkrieg eine noch nicht dagewesene Bedrohung der ganzen Menschheit darstellt.

Deshalb ist das *bedingungslose Verbot der Atomwaffen* schon seit Jahren von der Weltfriedensbewegung gefordert worden. Diese Forderung hat im „Stockholmer Appell“ und später im „Wiener Appell“ ihren Ausdruck gefunden, die von hunderten Millionen Menschen in Ost und West durch ihre Unterschrift bekräftigt worden sind. Dieses Verbot würde die Menschheit von einer furchtbaren Drohung befreien und gleichzeitig den Weg zur friedlichen Nutzung der Atomkraft freilegen, da Rohstoffe, Geräte und qualifizierte Arbeitskraft nicht mehr in die Hände des Militärs gelangen würden.

Die *Sowjetunion* hat wiederholt offiziell erklärt, daß sie für ein solches bedingungsloses Verbot eintritt. Diese Stellungnahme ist schon in dem Vertragsentwurf enthalten, den *Gromyko* der Atom-

energiekommission der Vereinten Nationen am 19. Juni 1946 vorgelegt hat; es heißt darin:

„Die vertragschließenden Staaten verpflichten sich: a) Atomwaffen unter keinen Umständen zu verwenden, b) die Erzeugung und Lagerung von Atomwaffen zu verbieten, c) innerhalb dreier Monate alle Lager von Atomwaffen zu zerstören.“

An der Stellungnahme der Sowjetregierung hat sich auch nichts geändert, nachdem die Sowjetunion ihre eigenen Atomwaffen entwickelt hatte. So erklärte *Andrej Wyschinski* im Abrüstungsausschuß der Vereinten Nationen Anfang 1954:

„Wir haben das Verbot der Atomwaffen vorgeschlagen, als wir sie noch nicht hatten. Jetzt, da wir sie besitzen, halten wir ebenso ernst an diesem Vorschlag fest. Wir haben auch das Verbot der Wasserstoffbombe verlangt, bevor wir sie konstruiert hatten. Wir fordern auch heute ihr Verbot, obgleich wir die Wasserstoffbombe hergestellt haben.“

Tatsächlich haben in den letzten Jahren weiteste Kreise der Menschheit unabhängig von ihrer Weltanschauung die Atomkriegsgefahr erkannt. Zu jenen, die sich für das Verbot der Atomwaffen ausgesprochen haben, gehören die Vertreter der volkreichsten Länder der Welt, wie die Ministerpräsidenten Chinas, Indiens, Indonesiens und das japanische Parlament. Auch zahllose unterrichtete Persönlichkeiten des Abendlandes — Wissenschaftler, Künstler, Gewerkschafter, Politiker, Geistliche — haben das Atomwaffenverbot gefordert. „Ich glaube, es gibt heute keinen ernst zu nehmenden Atomwissenschaftler, dem nicht die Anwendung der Wasserstoffbombe ein Grauen einflößte“, schrieb im Februar 1955 *Otto Hahn*.

Besonderes Gewicht kommt natürlich der Stimme der japanischen Wissenschaft zu. Im April 1954 faßte die Generalversammlung des offiziellen *Japanischen Wissenschaftlichen Rates* den Beschluß: „Wir glauben das allgemeine Gefühl der Menschen in aller Welt auszusprechen, indem wir ernsthaft die Unterlassung der Experimente mit Atom- und Wasserstoffwaffen, das Verbot der massenvernichtenden Atomwaffen und die Errichtung einer wirkungsvollen internationalen Kontrolle der Atomenergie fordern.“

Dagegen haben sich die Vereinigten Staaten niemals mit einem

Verbot der Atomwaffen abgefunden; sie haben sich sogar gegen den Stockholmer und den Wiener Appell gewandt. Sie haben den „*Baruch-Plan*“ vorgelegt, der nach dem alten Finanzmagnaten *Bernard Baruch* benannt ist. Das Hauptmerkmal dieses Planes besteht darin, daß in absehbarer Zeit *kein* Atomwaffenverbot erlassen werden soll. Ein Verbot soll vielmehr erst in Kraft treten, nachdem sämtliche der Atomenergie dienende Anlagen in der ganzen Welt in den Besitz eines *internationalen Atomtrusts* übergegangen sind.

Dieser Atomtrust soll nach dem *Baruch-Plan* von den Vereinten Nationen gebildet, also von Amerika beherrscht werden. Der Atomtrust kann dann nach Belieben wirtschaften, infolgedessen auch willkürlich — durch Mehrheitsbeschluß — über die Verteilung von Atomkraftwerken, Versuchsstationen und Atomrüstungsanlagen entscheiden. Er kann daher beispielsweise verordnen, daß solche Anlagen nur in der kapitalistischen Welt errichtet werden dürfen. In der Praxis würde der *Baruch-Plan* also zwar nicht zu einem Atomwaffenverbot, wohl aber zu einem *amerikanischen Atomenergiemonopol* führen.

Daß die amerikanische Regierung ein Atomwaffenverbot gar nicht ernstlich in Erwägung zieht, ergibt sich auch schon daraus, daß sie seit 1953 — freilich nicht ohne starken Widerstand in der amerikanischen Öffentlichkeit zu finden — alle ihre militärischen Pläne dem Gedanken des *Fernbombardements mit Atomwaffen* untergeordnet hat, das vorläufig durch die strategische Luftwaffe, später aber durch *interkontinentale Raketen mit Wasserstoff-Sprengladung* erfolgen soll. Daß man mit Raketen nicht gut zielen kann, wird insofern nicht tragisch genommen, als sich der Bereich der Verwüstung ohnehin über riesige Flächen erstreckt. Der Generalstab des unter amerikanischer Leitung stehenden Nordatlantikblocks hat Anfang 1955 ebenfalls den Beschluß gefaßt, seine strategischen Pläne vollkommen auf die Verwendung der Atomwaffen zu gründen.

Auch in der programmatischen Rede des Präsidenten *Eisenhower* vor den Vereinten Nationen im Dezember 1953, in der er den Vorschlag einer *internationalen Atombank* einbrachte, ist von einem Verbot der Atomwaffen nicht die Rede. In den Verhandlungen über das Atomproblem, die auf Initiative der Sowjetregierung anschließend an diese Rede aufgenommen wurden, hat sich, wie der

seither veröffentlichte Notenwechsel zeigt, die amerikanische Regierung wieder beharrlich geweigert, ein Verbot der Atomwaffen in Erwägung zu ziehen. Sie hat sich vielmehr auf den Standpunkt gestellt, es sei bloß ein Teil der Atomenergie-Hilfsmittel von den beteiligten Staaten in diese Bank einzuzahlen, der Hauptteil aber könne weiter der Rüstung dienen.

Das Dritte Reich und die Atomenergie

Nach dem Abwurf der ersten Atombombe auf die unselige Stadt Hiroshima verbreiteten unentwegt Nazi das Gerücht, die Erfindung der Atombombe sei eigentlich den Deutschen zu „verdanken“. Erst nach der Kapitulation seien die Amerikaner durch den Einblick in die deutschen Geheimnisse zur Herstellung der Bombe befähigt gewesen.

Dies ist vollkommener Unsinn. Deutschland war meilenweit zurück. Ja, Deutschland war sogar viel weiter zurück, als man bloß im Hinblick auf die materielle Überlegenheit der Alliierten in den letzten Kriegsjahren erwartet hätte. Der Bau von Reaktoren der Stufen I und II hätte gar keine besondere materielle oder finanzielle Anstrengung erfordert. Man wird vielmehr zu dem Schluß gedrängt: Die deutsche Naturwissenschaft, die jahrhundertlang einen der ersten Plätze in der Welt eingenommen hatte, bewährte sich im Dritten Reich nicht.

Diese auffallende Tatsache wird von *Thirring* in seinem Buch „Die Geschichte der Atombombe“ auf *politische Gründe* zurückgeführt. Zu diesen gehört vor allem die Vertreibung der demokratischen und der jüdischen Forscher, dann die Unlust der Besseren unter den Verbliebenen, zum Sieg eines verhaßten Regimes beizutragen, und schließlich die Unterdrückung der echten wissenschaftlichen Forschung auf entscheidenden Gebieten bei gleichzeitigem Überhandnehmen einer Art faschistischer Blut-und-Boden-Physik, der sogenannten „Deutschen Physik“. Das Ohr der Reichsführung hatten vor allem die SS-Physiker, die die Relativitätstheorie und ähnliche „kulturbolschewistische Asphalttheorien“ verwarfen.

Diese Auffassung findet ihre konkrete Bestätigung durch den holländischen Physiker *Samuel Goudsmit*. Dieser zeigt mit aller Klarheit, daß es in erster Linie nicht die materielle Überlegenheit der anderen, sondern die eigene moralische Schwäche war, die das Dritte Reich auf diesem wie auf anderen Gebieten scheitern ließ.

Nach der Eroberung französischer und deutscher Universitätsstädte verhörte *Goudsmit* die dortigen Wissenschaftler, um die deutschen Atomenergiegeheimnisse aufzudecken. Zu Beginn tappte er im Dunkeln. Man wußte nicht einmal, ob Deutschland weiter oder weniger weit als die Alliierten war. Noch standen die Alliierten im Banne des traditionellen Rufes der deutschen Wissenschaft. Daher wurde auch das vorhandene Nachrichtenstückwerk stets in pessimistischem Sinn interpretiert. Zum Beispiel entdeckte man, daß ein Vertreter der Deutschen *Auer*-Gesellschaft, die ohnehin in der Kriegsindustrie eine wichtige Rolle spielte, im besetzten Frankreich eifrig nach Thorium gesucht hatte. Mit Besorgnis wurde daraus geschlossen, daß die Deutschen offenbar schon über das reine Uranstadium hinaus waren. Eine Jagd nach dem Thoriumsucher setzte ein. Glücklicherweise wurde er in der Nähe Kölns bei einer Freundin aufgespürt. Um so „enttäuschender“ war es, als es sich glaubwürdig zeigte, daß der junge Mann Thorium nur als Bestandteil einer neuartigen Zahnpasta vorgesehen hatte...

Erst nach der Einnahme von Straßburg, Ende 1944, ergab sich aus den dort entdeckten Papieren, daß Deutschland noch im „Stadium 1940“ stand. Dies bestätigte sich vollkommen nach der Einnahme der Zentren der Atomenergieforschung in Heidelberg, Berlin und Hechingen, wohin das Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik verlagert worden war. Obwohl doch der erste Nachweis der Atomkernspaltung des Urans auf den Deutschen *Otto Hahn* (kein Nazi!) zurückging, *hatte die deutsche Atomenergieorganisation bis Kriegsende keinen einzigen Reaktor in Gang gebracht*, das heißt, sie war nicht bis zu dem andernorts seit Jahren erreichten Punkt vorgedrungen. Ähnlich stand es theoretisch: Der Gedanke, Plutonium, das in einem laufenden Reaktor automatisch ständig erzeugt wird, für Bomben in Aussicht zu nehmen, war nicht verfolgt worden, obwohl ein gewisser *Houtermans* dies in einem Memorandum im Jahre 1941 vor-

D. D. A. G. R.
König & Göttsche, Berlin

Geheim

9.
8. Juli 1943

He

Herrn
Ministerialrat Dr. G ö r n n e r t,
Stabschef des Reichsmarschalls,

B e r l i n W. O.
Leipziger Str. 3

Rf. 1481/43 g. Sr/Se.

Lieber Parteigenosse Görnert!

In der Anlage übersende ich einen Bericht des Bevollmächtigten für Kernphysik, Staatsrat Prof. Dr. E a a u über den gegenwärtigen Stand der Arbeiten mit der Bitte, dem Herrn Reichsmarschall darüber vortragen zu wollen. Wie Sie aus dem Bericht ersehen können, sind die Arbeiten in den wenigen Monaten doch ganz erheblich gefördert worden. Wenn auch die Arbeiten nicht in kurzer Zeit zur Schaffung von praktisch brauchbaren Kraftmaschinen oder Sprengstoffen führen werden, so ist auf der anderen Seite aber auch die Sicherheit vorhanden, daß die Feindmächte uns auf diesem Gebiet nicht mit Überraschungen aufwarten können.

Mit besten Grüßen

Heil Hitler!
Ihr

Georg Meißner

geschlagen hatte. Vielmehr war geplant, einen Reaktor als solchen als Bombe zu verwenden und von einem Flugzeug abzuwerfen. *Diese Idee ist aber ganz abwegig.* Erstens sind die Reaktoren zu groß und zu schwer. Vor allem aber erhält man auf diese Weise überhaupt keine wirksame Explosion (siehe S. 120 und 155).

Erstaunlich war dabei die Selbstzufriedenheit und der Mangel an Selbstkritik bei den Leitern des deutschen Projektes. Wie sehr sie sich in Sicherheit wiegten, ergibt sich schlagend aus einem vom 8. Juli 1943 datierten Brief des SS-Generals, Trägers des Goldenen Parteiabzeichens und Beauftragten für Wehrforschung an den deutschen Hochschulen, *Rudolph Mentzel*, an den Stab des Reichsmarschalls *Hermann Göring*. In diesem Brief (siehe das *Faksimile des Originalbriefes*) heißt es: „Wenn auch die Arbeiten nicht in kurzer Zeit zur Schaffung von praktisch brauchbaren Kraftmaschinen oder Sprengstoffen führen werden, so ist auf der anderen Seite aber auch die Sicherheit vorhanden, daß die Feindmächte uns auf diesem Gebiet nicht mit Überraschungen aufwarten können.“ Selbst im Dezember 1944 konnte der bedeutende Physiker *Gerlach* noch erklären: „Ich bin überzeugt, daß wir noch immer den Amerikanern gegenüber die Führung haben.“ Diese unkritische Einstellung konnte sich natürlich nur in der Stickluft des Dritten Reiches halten.

Die Verwendung von Radioelementen in Forschung und Technik

Methode der „radioaktiven Indikatoren“ („markierte Atome“)

Neben der Verwendung der Atomenergie zur Elektrizitäts- und zur Wärmeerzeugung ist ihre Verwendung zur Herstellung radioaktiver Stoffe von allergrößter Bedeutung, und zwar werden die in den Reaktoren in großer Menge gewinnbaren Radioelemente entweder als *radioaktive Indikatoren* oder als *Strahlenquellen* verwendet.

Worin besteht nun diese Methode der *radioaktiven Indikatoren*? Sie beruht auf der Erkenntnis, daß sich die radioaktiven Isotope, wie schon dargelegt wurde, von den inaktiven Isotopen desselben Elements in chemischer Hinsicht nicht unterscheiden. Daher ist im allgemeinen auch nicht zu befürchten, daß die aktiven Isotope sich im Verlaufe irgendwelcher chemischer Vorgänge von selbst von den inaktiven Isotopen trennen. Sie werden sich vielmehr identisch verhalten; daher wird das Mischungsverhältnis stets das gleiche bleiben, was immer auch mit dem betrachteten chemischen System geschehen mag. Dieser Umstand wurde von *G. Hevesy* und *F. Paneth* am Wiener Radiuminstitut noch vor dem Ersten Weltkrieg zur Klärung chemischer Fragen benützt. Später behandelte *Hevesy* auch biologische Probleme mit radioaktiven Indikatoren.

Um nun das Wesen dieser äußerst leistungsfähigen Methode zu veranschaulichen, sei zunächst ihr erstes Anwendungsbeispiel beschrieben, das wir eben *Paneth* und *Hevesy* verdanken. Die Bestimmung der *Löslichkeit* fester Stoffe in Flüssigkeiten stellt ein typisches physikalisch-chemisches Problem dar. Die Bestimmung der Löslichkeit hat

nicht nur wissenschaftliches, sondern sehr oft auch überaus großes technisches oder biologisches Interesse. Man denke etwa daran, daß die Aufnahme von Düngemitteln durch Pflanzen von ihrer Löslichkeit abhängt. Solche Löslichkeitsbestimmungen sind leicht, wenn die Stoffe gut löslich sind, wie zum Beispiel Kochsalz oder Zucker. Sie waren aber nach den herkömmlichen Methoden kaum durchzuführen, wenn die Löslichkeit sehr gering ist, wenn also das Lösungsmittel (zum Beispiel Wasser) nur unwägbare kleine Mengen des zu untersuchenden Stoffes aufnimmt. Es gibt Salze, deren „gesättigte“ Lösung nur milliardstel Gramm pro Liter Wasser enthält. Dennoch kann die Bestimmung geringer Grade von Löslichkeit wichtig sein.

Zu den Salzen von derart minimaler Löslichkeit gehört beispielsweise das Bleichromat (chromsaures Blei). *Hevesy* und *Paneth* setzten nun einer Probe von gewöhnlichem Bleichromat eine bekannte, sehr geringe Menge radioaktiven Bleichromats, also Chromat von radioaktivem Blei, zu und vermischten aktives und inaktives Salz aufs gründlichste. Auf diese Weise „indizierten“ sie das gewöhnliche Blei mit radioaktivem Blei, das auch kurz als Radioblei bezeichnet wird; seine Halbwertszeit beträgt 22 Jahre. Das Wort „indizieren“ ist lateinischen Ursprungs und heißt „anzeigen“. Die radioaktive Strahlung zeigt nämlich an, wo sich das durch Zumischung des radioaktiven Isotops strahlend gemachte Blei jeweils befindet. Das indizierte Blei kann also durch seine Strahlung leicht aufgefunden und gemessen werden. Daher sprechen wir von der *Methode der „radioaktiven Indikatoren“*. Die Methode wird auch als „*Methode der markierten Atome*“ bezeichnet, weil man mit den radioaktiv indizierten Atomen so arbeiten kann, als hätte man ihnen zur Auffindung und Unterscheidung Schildchen angeklebt, ohne sonst ihre Eigenschaften zu verändern — als hätte man sie „markiert“.

Zur Bestimmung der Löslichkeit des Bleichromats schüttelten die beiden Forscher nun eine bestimmte Wassermenge so lange mit dem markierten Salz, bis sie annehmen konnten, daß die Lösung mit dem Salz gesättigt war, also kein weiteres Salz aufnehmen werde. Da aktives und inaktives Blei, wie wir immer wieder betonen, sich in ihren chemischen Eigenschaften — daher auch in ihrer Löslichkeit — gleich verhalten, muß offenbar das Mengenverhältnis von

aktivem und inaktivem Blei im gelösten Anteil genau das gleiche sein wie in der Gesamtmenge des Salzes oder wie im ungelösten Anteil, dem sogenannten Bodenkörper. Wenn also von vornherein, wie dies ja zutrifft, dieses Mengenverhältnis im gesamten Blei bekannt ist, so kann man aus der Menge Radioblei in der Lösung auf die in ihr enthaltene Menge Gesamtlei, also auf den Löslichkeitsgrad schließen.

Zur praktischen Durchführung der Bestimmung werden Lösung und Bodenkörper nach dem Schütteln voneinander getrennt, was am einfachsten durch Filtrieren geschieht. Dann wird die Lösung eingedampft, um das Wasser loszuwerden, und die Radioaktivität des verbleibenden Rückstandes mit einem Meßgerät (*Geiger-Zählrohr*) bestimmt. Dieser Rückstand hat zwar ein so geringes Gewicht, daß er sich nicht wägen läßt und auch gar nicht sichtbar ist; dennoch kann aus seiner Radioaktivität auf seine Masse und damit auch auf den Bleigehalt der gesättigten Lösung geschlossen werden. Die Löslichkeit ergab sich im Falle des Bleichromats zu etwa einem hunderttausendstel Milligramm, also einem hundertmillionstel Gramm pro Liter. Nach diesem Prinzip sind im Laufe der letzten Jahrzehnte ungezählte wichtige physikalische und chemische Kenngrößen von Stoffen bestimmt worden.

In anderen Fällen, in denen die Methode der markierten Atome Anwendung findet, macht man von dem Umstand Gebrauch, daß die aktiven und inaktiven Isotope, obgleich chemisch identisch, doch durch die Radioaktivität voneinander unterschieden werden können. Diese Gruppe von Anwendungen hat insofern besondere Bedeutung, als sie uns Kenntnisse liefert, die nach älteren Methoden selbst dann nicht zu erhalten wären, wenn man ihre Genauigkeit in beliebigem Maße steigern könnte.

Zum Beispiel muß es die *Biologen* und die *Mediziner* interessieren, innerhalb welcher Zeit *Eisen*, das einem Versuchstier in Form einer chemischen Verbindung mit der Nahrung zugeführt wurde, im Farbstoff der roten Blutkörperchen (Hämoglobin) auftaucht, der bekanntlich Eisen enthält. Diese Frage war vor der Erfindung der Methode der markierten Atome kaum zu beantworten. Man konnte ja die schon vorher im Körper vorhandenen Eisenatome von den neuzugeführten Eisenatomen nicht unterscheiden. Nun aber läßt sich

ein einfaches Experiment anstellen. Man setzt dem Futter, das seine übliche Menge gewöhnliches Eisen enthält, noch radioaktives Eisensalz in unwägbare, aber durch seine Strahlung noch gut meßbarer Menge zu. Das Radioeisen (Halbwertszeit drei Jahre), das sich chemisch wie das gewöhnliche Eisen verhält, wandert mit der gleichen Geschwindigkeit wie dieses durch die Organe des Körpers. Es zeigt aber durch seine Radioaktivität stets an, wo es sich befindet.

Wenn man also dem Versuchstier von Zeit zu Zeit eine Probe Hämoglobin entnimmt, so erkennt man an ihrer Radioaktivität, wie weit schon ein Ersatz alten (nicht radioaktiven) Eisens durch neues (radioaktives) Eisen erfolgt ist. Man mißt auf diese Weise die „Umschlagszeit“ des Eisens in den Blutkörperchen, löst also ein „Transport“- oder „Stoffwechsel“-Problem. Es zeigt sich übrigens in dem besprochenen Falle, daß das neuerabreichte Eisen innerhalb weniger Stunden in den roten Blutkörperchen auftaucht, daß aber der völlige Ersatz des „alten“ durch das „neue“ Eisen, zum Beispiel bei Hühnern, mehrere Monate beansprucht. Natürlich muß man bei Versuchen dieser Art darauf achten, daß der Körper des Tieres durch die Strahlen nicht geschädigt wird und sich dann anders verhält als im Normalzustand. Man kommt aber in der Praxis der Indikatorenexperimente mit so kleinen Mengen an Radioelement aus, daß eine Schädigung nicht zu befürchten ist.

Studium des Pflanzenbaues und des pflanzlichen Stoffwechsels

Assimilation von Kohlensäure

Ein besonders interessantes, aus neuester Zeit stammendes Beispiel für die Anwendung der Methode der markierten Atome zur Aufklärung eines alten wissenschaftlichen Problems ist die Untersuchung der *Photosynthese* mit Hilfe des Radiokohlenstoffs (Halbwertszeit 5600 Jahre). Bekanntlich beziehen (assimilieren) alle Pflanzen, die den grünen Farbstoff *Chlorophyll* enthalten, den zum Aufbau ihrer Körpersubstanz nötigen Kohlenstoff aus der Kohlen-

säure (CO₂) der Luft. Die zur Umwandlung der Kohlensäure in die organischen Verbindungen der Pflanze erforderliche Energie wird durch das *Sonnenlicht* geliefert. Fast das ganze Leben auf der Erde, wie wir es heute kennen, beruht auf dieser Photosynthese-Reaktion, da Tier und Mensch letzten Endes von den grünen Pflanzen leben. Die Leistungsfähigkeit der Pflanzenwelt ist enorm. Ein Hektar Zuckerrübe kann im Laufe einer Wachstumsperiode der Luft 50 Tonnen Kohlenstoff entziehen. Die Gesamtleistung der irdischen Pflanzenwelt wird auf 300 Milliarden Tonnen Kohlenstoff im Jahr geschätzt. Zum Vergleich sei erwähnt, daß der Gesamtgehalt der innerhalb eines Jahres geförderten Steinkohle an Kohlenstoff bei weitem nicht ein Prozent dieses Betrages erreicht.

Die Pflanze erzeugt also aus dem höchst einfach gebauten Molekül der Kohlensäure die ganze bunte Vielfalt der sogenannten Pflanzenstoffe, nämlich Zuckerarten, Eiweißstoffe, Fette, Farbstoffe, Wirkstoffe usw. Natürlich kann ein solcher Aufbau nicht auf einen Schlag erfolgen, sondern man muß annehmen, daß durch Photosynthese unmittelbar irgendwelche relativ einfach gebaute, also nur wenige Atome im Molekül enthaltende Primärprodukte entstehen. Erst diese werden dann allmählich zu komplizierter gebauten Stoffen weiterverarbeitet. Wie kompliziert die Stoffe sein können, erkennt man aus der Existenz von Eiweißkörpern, deren Moleküle Millionen Atome enthalten, wobei jedes einzelne Atom einen ganz bestimmten Platz im Molekül einnehmen muß.

Man hat schon lange vermutet, daß die Pflanzen die komplizierten Stoffe aus *Zuckerarten* aufbauen. Zuckerarten, wie Traubenzucker (Glukose), Fruchtzucker (Fruktose) und Rohrzucker (Sacharose), sind nämlich im Pflanzen- wie auch im Tierreich weit verbreitet. Aber schon Zuckermoleküle von relativ einfachem Bau enthalten viele Atome, zum Beispiel hat jenes des Traubenzuckers immerhin schon 24 Atome. Man kann daher nicht annehmen, daß Zucker schon ein echtes Primärprodukt, also eines der allerersten Produkte der Photosynthese sei. Die Auffindung der Primärprodukte ist erst mit Hilfe der Methode der markierten Atome gelungen.

Die Forschungen wurden zumeist an *Algen* ausgeführt, da diese sich leicht züchten lassen und sich unbegrenzt vermehren, ohne

während der Vermehrung ihre Eigenschaften zu ändern, wohingegen sich das Wachstum höherer Pflanzen natürlich irgendwann verlangsamt. Aufschwemmungen von Algen in Nährstofflösungen wurden im Dunkeln in eine Atmosphäre von radioaktiver Kohlensäure gebracht. Dann wurde kurzzeitig belichtet, und die Algen wurden anschließend sofort getötet, wobei die Stoffwechselvorgänge in ihren Körpern zum Stillstand gebracht wurden. Dies geschah, indem man die Aufschwemmung der Algen in siedenden Alkohol fließen ließ. Sodann wurden die chemischen Bestandteile der Algen voneinander getrennt und einzeln auf Radioaktivität geprüft. Erwies sich ein Bestandteil, zum Beispiel eine bestimmte Art Zucker, als radioaktiv, so mußte geschlossen werden, daß dieser Zucker von der Alge während der kurzzeitigen Belichtung aus der Radiokohlensäure gebildet worden war; denn im Dunkeln findet so gut wie gar keine Assimilation von Kohlensäure statt.

Indem man nun in einer Serie derartiger Versuche die *Belichtungszeiten* immer weiter verkürzt, nimmt man der Pflanze immer mehr Zeit weg, die sie zum Aufbau komplizierterer Verbindungen aus den Primärprodukten benötigen würde. Je kürzer also die Belichtungszeit, desto mehr müssen unter den gefundenen radioaktiven Pflanzenstoffen die allereinfachsten und am schnellsten gebildeten Verbindungen vorherrschen. Bei extrem kurzen Belichtungszeiten sollte schließlich überhaupt nur mehr das echte Primärprodukt der Photosynthese in radioaktiver Form vorliegen. Tatsächlich ist man imstande, durch sinnreiche Einrichtungen die Belichtungszeit bis auf Bruchteile einer Sekunde herabzusetzen. Zu diesem Zweck jagt man einen raschen Strom von Algenaufschwemmung in einem Glasrohr an einer starken Lichtquelle vorbei in den siedenden Alkohol.

Durch solche Versuche fand man, daß die Pflanze z. B. zum Aufbau von Rohrzucker nur 90 Sekunden und zum Aufbau der Bausteine des Eiweißes, der sogenannten Aminosäuren, sogar nur fünf Sekunden braucht. Äußerst beachtliche Leistungen — der Mensch braucht zur Synthese solcher Stoffe im Laboratorium Wochen, Monate oder Jahre! Als Primärprodukt der Photosynthese wurde jedoch eine viel einfachere Verbindung identifiziert, nämlich die

sogenannte Phosphorglyzerinsäure, die erst drei Atome Kohlenstoff — dazu aber auch, wie schon der Name verrät, ein Atom Phosphor — im Molekül enthält. Diese Säure entsteht offenbar durch Aufnahme der Kohlensäure durch eine bestimmte, in der Pflanze vorgebildete Verbindung während der Belichtung.

Mit diesen Forschungen in Zusammenhang stehen wichtige Arbeiten über die *Aufnahme von Kohlensäure durch das Wurzelsystem* der Pflanze. Früher glaubte man, die Pflanze könne nur durch ihre oberirdischen, grünen Teile Kohlensäure assimilieren. Nun stellten aber russische Forscher Versuche an, bei denen lediglich den unterirdischen Teilen markierte Kohlensäure zugeführt wurde, ohne daß diese mit den grünen Teilen in Berührung kommen konnte. Man fand dabei, daß alsbald ein Strom radioaktiver Kohlenstoffverbindungen mit dem Saft von den Wurzeln in die oberirdischen Teile der Pflanze stieg. Der Radiokohlenstoff mußte also durch die Wurzel aufgenommen worden sein — ohne direkte Hilfe des Blattgrüns, des Chlorophylls.

Freilich muß man dabei annehmen, daß die zur Assimilation der Kohlensäure und zum Aufbau der organischen Verbindungen notwendige, sehr beträchtliche Energie ebenso wie bei der „normalen“ Assimilation durch das grüne Blatt letzten Endes vom Sonnenlicht geliefert wird, wenn dieses natürlich auch nicht zu den Wurzeln vordringt. Offenbar bilden sich oberirdisch unter dem Einfluß des Sonnenlichtes energiereiche organische Stoffe, die dann ins Wurzelsystem hinabwandern und dort kraft ihres Energiegehaltes die Assimilation von Kohlensäure im Dunkeln ermöglichen.

Vielleicht werden diese neuen Erkenntnisse auch unmittelbar praktische Auswirkungen haben. Bisher hat man den Pflanzenwurzeln vor allem die Elemente Phosphor, Kalium und Stickstoff mit dem *Dünger* zugeführt, da diese Elemente von *Justus Liebig* als für die Pflanzen lebenswichtig erkannt worden waren. Es kann auf Grund der beschriebenen Forschungen mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß sich auch eine direkte Versorgung der Wurzeln mit Kohlensäure als vorteilhaft erweist. Die Kohlensäure könnte als solche oder in Form von Verbindungen, zum Beispiel von kohlen-saurem Kalk, verwendet werden.

Bildung technisch wichtiger Pflanzenstoffe

Die markierten Atome haben auch das Studium der Bildung besonderer, oft technisch wichtiger Pflanzenstoffe erleichtert. Darüber wird hier nicht deshalb berichtet, weil etwa schon jetzt entscheidende Ergebnisse erzielt worden wären, sondern zu dem Zweck, die Leistungsfähigkeit der Methode klarzumachen. Beispielsweise stammt der *Naturkautschuk* aus dem Milchsaft bestimmter Pflanzen der tropischen Zone (hauptsächlich des Gummibaumes *Hevea*, der vor allem in Südostasien kultiviert wird) oder auch der gemäßigten Zone (wie der Löwenzahnart *Kok-sagys* in der Sowjetunion). Es war früher nichts darüber bekannt, auf welchem Wege die Pflanze den Kautschuk, einen chemisch recht komplizierten Stoff, aus einfacheren Verbindungen aufbaut. Um so weniger kannte man daher rationelle Maßnahmen zur Förderung der Kautschukbildung durch die Pflanze.

Dem Mechanismus der Kautschukbildung kann man nun nachspüren, indem man dem Kautschukbaum die vermuteten *Zwischenstoffe* in radioaktiv markierter Form zuführt. Man kann diese markierten Verbindungen zum Beispiel in den Saftstrom injizieren. Nach einer Weile sieht man dann nach, ob der neugebildete Kautschuk sich als radioaktiv erweist. Wenn dies tatsächlich zutrifft, so muß geschlossen werden, daß die Pflanze die in radioaktiver Form zugeführten Stoffe für die Kautschukbildung zu verwerten vermag, also auf ihre Verwertung biologisch „eingrichtet“ ist. Das ist aber gewiß nur dann der Fall, wenn eine solche Einrichtung auch unter natürlichen Bedingungen benützt wird, wenn also der in radioaktiver Form zugeführte Stoff ein tatsächlich auch unter natürlichen Verhältnissen, allerdings in nichtaktiver Form, auftretender Zwischenstoff ist. Es ergab sich, daß die *Hevea* die relativ einfach gebaute Verbindung Valerianaldehyd, die im Laboratorium leicht herzustellen ist, zur Kautschuksynthese verwendet. Vielleicht wird man einmal den Kautschukertrag steigern, indem man dem Baum schon fertigen Valerianaldehyd zuführt und ihm dessen Synthese erspart.

Nicht unbedingt muß der Pflanzenstoff, dessen natürliche Synthese untersucht wird, wertvoll sein. Ein Gegenbeispiel ist etwa das *Lignin*, das ein volles Drittel der *Holzsubstanz* unserer Wälder aus-

macht. Wenn aus dem Holz durch das Kochen mit Laugen zum Zweck der Herstellung von Papier, Kunstfasern, Lacken oder Sprengstoffen die Zellulose gewonnen wird, so hinterbleibt die enorme Menge des Lignins als Lösung in der Kochlauge. Diese Lösungen sind praktisch wertlos, ja sie verschmutzen sogar in höchst unerwünschter Weise die Flüsse, in die sie geleitet werden. Eine befriedigende Möglichkeit zur Verwertung der vielen Millionen Tonnen Lignin, die alljährlich in der Welt bei der Zelluloseerzeugung abfallen, ist bisher nicht bekanntgeworden, wenn darüber auch viel gearbeitet wird.

Eine Voraussetzung für die günstige Lösung des Problems ist die gründliche Kenntnis des Baus und der Bildung des Lignins, das eine äußerst komplizierte Verbindung ist. Auch hier leisten die markierten Atome ihren Beitrag. Es wurde gefunden, daß das sogenannte *Koniferin*, das die Chemiker synthetisch herstellen können, einen Zwischenstoff bei der Ligninbildung darstellt: Behandelt man die Wurzeln wachsender Pflanzen, zum Beispiel von Fichten, mit radioaktiver Koniferinlösung, so wird radioaktives Lignin gebildet. Vielleicht wird man eines Tages nach Lösung des Ligninproblems den ungeheuren Mengen Lignin, die man in die Flüsse gegossen und mit denen man die Fische vergiftet hat, noch Tränen nachweinen!

Düngeprobleme

Wirtschaftliche Bedeutung besitzt die Anwendung der Methode der markierten Atome auf das Studium des Pflanzenwuchses schon heute in bezug auf die *Düngeprobleme*. Wieviel Dünger — beispielsweise *Phosphorverbindung* — wird von der Pflanze unter gegebenen Umständen aufgenommen? Diese Frage konnte bisher nicht beantwortet werden, denn wie hätte man den schon vorher im Boden vorhandenen „Bodenphosphor“ von dem neuzugeführten Düngephosphor unterscheiden sollen? Man begnügte sich mit der Bestimmung der Differenz des Phosphorgehaltes in gedüngten und in ungedüngten Feldfrüchten; die Differenz wurde dem Düngephosphor zugeschrieben. Diese Vorgangsweise ist aber aus verschiedenen Gründen nichts weniger als einwandfrei. Vor allem ist die Annahme

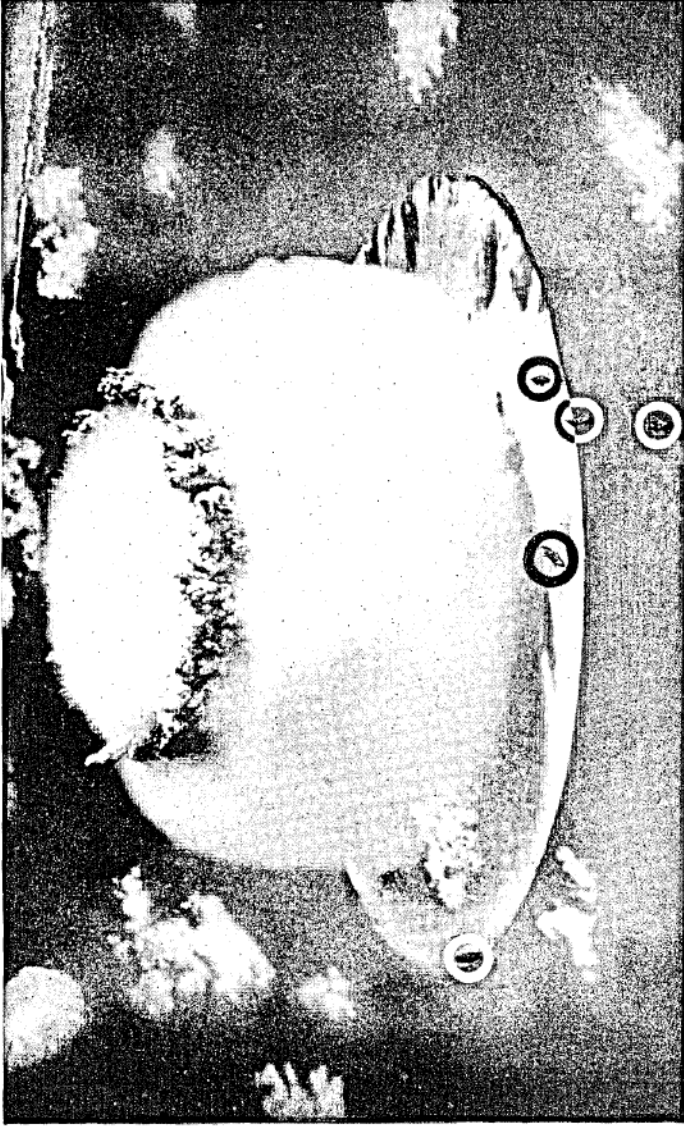
ganz ungerechtfertigt, daß die Aufnahme von Bodenphosphor bei Phosphordüngung unverändert bleibe.

Heute kann man den Düngephosphor, indem man ihn der Ackererde in markierter Form zuführt, ohne weiteres von dem nicht radioaktiven Bodenphosphor unterscheiden. Man hat auf diese Weise festgestellt, welche Arten von Düngemitteln von bestimmten Pflanzenarten am besten aufgenommen werden, und wie die Aufnahme von sonstigen Umständen abhängt. Allgemein hat sich gezeigt, daß die Düngewirkung um so stärker ist, je besser löslich das Düngemittel ist und je jünger die Pflanzen sind; den Bodenphosphor hingegen mobilisieren ältere Pflanzen relativ besser als jüngere Pflanzen. Auch hat man durch Versuche mit markierten Stoffen gefunden, daß Düngesalze (nicht nur Phosphor, auch Stickstoff) durch die *Blätter* rascher aufgenommen werden als durch die *Wurzeln*. Daher erreicht man durch Besprühen der Pflanzen mit Düngemittellösung besonders schnelle Düngewirkung.

Die *Erdnüsse*, die aus den Tropen stammen, aber neuerdings auch zum Beispiel in Ungarn gezüchtet werden, bilden ihre bei alt und jung beliebten öleichen Früchte unterirdisch aus, indem oberirdische Pflanzenteile sich wieder dem Boden nähern, sich in diesen eingraben und dann Frucht tragen. Beziehen nun die Früchte ihre Mineralstoffe auf dem Weg über den Pflanzenstiel oder aber direkt aus dem Boden? Mit den markierten Atomen fand man leicht, daß zwar Kalzium direkt aus dem Boden, Phosphor jedoch nur auf dem Weg über Wurzel und Stiel aufgenommen wird. Durch diese Untersuchung wurde mit einem Schlage ein schwieriges und wichtiges pflanzenphysiologisches Problem gelöst!

Pflanze und Tier benötigen nicht nur die wohlbekanntesten, von *Liebig* in ihrer Wichtigkeit erkannten Düngeelemente Kalium, Phosphor und Stickstoff, sondern auch die sogenannten *Spurenelemente*. Zu diesen gehören unter anderen Kupfer, Kobalt und Molybdän. Zwar braucht die Pflanze nur wenig, eben bloß Spuren von diesen Elementen; wenn sie ihr aber ganz entzogen werden, geht die Pflanze ein. Daher gedeihen Nutzpflanzen auf Böden nur schlecht, die an den lebensnotwendigen Spurenelementen besonders arm sind.

Der Stoffwechsel der Pflanze bezüglich dieser Spurenelemente



Unterwasserexplosion einer Atombombe im Bikini-Atoll am 25. Juli 1946

Die Größe der emporgeschleuderten Wassermassen ersieht man aus dem Vergleich mit den winzig erscheinenden (durch Kreise hervorgehobenen) Kriegsschiffen am Rande des Explosionfeldes.



Die Wasserstoffbombe ist explodiert

Die Aufnahme des am 1. März 1954 im Stillen Ozean durch die Explosion einer Wasserstoffbombe erzeugten „Pilzes“ wurde aus 75 Kilometer Entfernung vom Explosionsort in 4000 Meter Höhe gemacht. Der radioaktive Vulkenspilz ragte 10 000 Meter hoch und hatte einen Scheiteldurchmesser von 160 Kilometer. Noch in mehr als 120 Kilometer Entfernung fielen japanische Fischer dem aus der Wolke stammenden radioaktiven Staub zum Opfer!

läßt sich nun weitaus am besten mit Hilfe der Radioelemente verfolgen. Die winzigen von den Pflanzen aufgenommenen und benötigten Mengen entziehen sich häufig dem chemischen Nachweis nach den traditionellen Methoden, aber die Empfindlichkeit des Nachweises radioaktiver Strahlung ist so groß, daß auch die Spurenelemente erfaßt werden, wenn sie in markierter Form vorliegen. So hat man beispielsweise noch die Aufnahme von *Molybdän* durch Pflanzen aus Nährlösungen verfolgen können, die bloß ein milliardstel Gramm des Elements im Liter enthielten!

Studium des tierischen und des menschlichen Stoffwechsels

Kreislaufprobleme

Auch viele wichtige Probleme des tierischen und des menschlichen Stoffwechsels können mit Hilfe der markierten Atome leicht behandelt werden. Zu diesen Problemen gehören jene der *Zirkulation*, also des *Kreislaufs* von Elementen oder ihren Verbindungen, im Körper. Oft lassen sich durch Bestimmung der Kreislaufgeschwindigkeit *krankhafte Zustände* des Körpers erkennen, so daß dieses Verfahren zu einem wichtigen diagnostischen Hilfsmittel in der Hand des Arztes geworden ist. Natürlich ist stets unbedingt darauf zu achten, daß die Mengen an radioaktivem Stoff so klein sind, daß keine Schädigung des Körpers eintreten kann.

Das Element *Natrium* bildet in Form seines Chlorids, also des Kochsalzes (NaCl), den Hauptteil des Salzgehaltes der Flüssigkeiten im menschlichen Körper. Es interessiert nun sehr, mit welcher Geschwindigkeit Natrium durch den gesunden und durch den kranken Körper zirkuliert. Man führt dem Körper durch den Magen oder durch Injektion eine kleine Menge radioaktiven Kochsalzes zu. Das Radionatrium sendet durchdringende Gammastrahlung aus. Daher kann man durch laufende Messung der Strahlungsstärke an verschiedenen Teilen der Körperoberfläche nach Verabreichung des Kochsalzes die Geschwindigkeit ermitteln, mit der das Radionatrium

an diesen Stellen eintrifft, und schließlich die endgültige Konzentration erreicht. Dies ist der Fall, sobald sich das Natrium gleichmäßig über den ihm im Körper zur Verfügung stehenden Raum verbreitet hat. Nach Eintritt dieses „Gleichgewichtszustandes“, der normalerweise nach einer Stunde erreicht ist, ändert sich die Intensität der Gammastrahlung nicht mehr — oder, genauer ausgedrückt: sie nimmt dann überall langsam in dem Maße ab, in dem die Aktivität des Radionatriums abklingt (Halbwertszeit 15 Stunden). Bei bestimmten *Schockzuständen* kann freilich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Natriums im Körper auf die Hälfte herabgesetzt sein.

Die Messung der Strahlungsstärke am Körper selbst von außen her ist verhältnismäßig einfach. Für genauere Bestimmungen begnügt man sich aber nicht mit dieser Bestimmungsmethode, sondern man zapft dem Körper laufend kleine Mengen Körperflüssigkeit — insbesondere Blut — ab und bestimmt den Radionatriumgehalt der Flüssigkeit. Nach Erreichung des Gleichgewichtszustandes ändert sich die Radionatriumkonzentration in der Flüssigkeit natürlich nicht mehr. Man kann dann auch leicht das ganze Volumen bestimmen, über das sich das Natrium gleichmäßig im Körper verbreitet hat, den sogenannten *Natriumraum*. Wenn man nämlich einerseits die gesamte zugeführte Radionatriummenge kennt und andererseits auch die Radionatriummenge bestimmt hat, die in einem Kubikzentimeter enthalten ist, so kann man sogleich schließen, über wie viele Kubikzentimeter sich das Natrium verteilt hat. Der Natriumraum entspricht, wie man experimentell gefunden hat, etwa einem Viertel des Körpervolumens, bei einem Mann normaler Größe also etwa 18 Litern; davon entfallen auf die Blutgefäße nur sechs Liter. Der analog bestimmte *Kaliumraum* ist viel größer als der Natriumraum, da das Kalium, im Gegensatz zum Natrium, auch in das Innere der Körperzellen eindringen kann.

Nicht nur das Volumen des Raumes, über den sich *gelöste* Elemente im Körper verbreiten, läßt sich derart bestimmen, sondern auch das Volumen des im Körper enthaltenen *Wassers* selbst. Zu diesem Zweck markiert man das Wasser, was durch Zufügen von radioaktivem „überschwerem“ Wasser (Tritiumoxyd, T_2O , siehe S. 73) geschieht. Eine bekannte Menge radioaktiven Wassers wird injiziert

und verbreitet sich allmählich gleichmäßig über das im Körper bereits vorhandene Wasser. Nach einigen Stunden ist der Gleichgewichtszustand praktisch erreicht, es finden also keine Änderungen mehr statt. Nun entnimmt man dem Körper eine Wasserprobe. Durch Vergleich der in dieser Probe gefundenen Menge an Radiowasserstoff mit der Gesamtmenge an Radiowasserstoff, die dem Körper zugeführt worden war, erkennt man, wie weit das radioaktive Wasser im Körper verdünnt wurde. (Ein nur geringer Fehler entsteht dabei dadurch, daß der Radiowasserstoff im Körper zum kleinen Teil auch in andere wasserstoffhaltige Stoffe als Wasser eintritt.) Es ergibt sich, daß etwa 70 Prozent des Gesamtgewichtes des Menschen aus Wasser bestehen. Wir erinnern uns, daß nur ein Viertel des Körpers den Natriumsalzen zugänglich ist; der Hauptteil der Körperflüssigkeit enthält also (fast) keine Natriumsalze.

Speicherung von Elementen

Während nun das Wasser selbst sowie auch manche andere Stoffe, wie z. B. die schon erwähnten Elemente Natrium und Kalium, sich über große Teile des Körpers verbreiten, werden andere Elemente im höchsten Maße „selektiv“, nämlich bestimmte Organe des Körpers gleichsam auswählend, in diesen angereichert.

Das klassische Beispiel ist das *Jod*. Dieses lebenswichtige Element wird, wie sich mit Hilfe von Radiojod (Halbwertszeit 8 Tage) sehr überzeugend zeigen läßt, in kürzester Zeit (in wenigen Minuten) einem ganz bestimmten Organ zugeleitet, nämlich der *Schilddrüse*, die sich in der Gegend des Halses befindet. Diese Drüse verarbeitet das in Form freier Jodmoleküle oder einfacher Jodsalze verabreichte Jod sehr rasch zu einem bestimmten *Hormon*, dem Thyroxin. Diese jodhaltige Verbindung kann auch synthetisch hergestellt werden. Mangel an Thyroxin verursacht *Kropfbildung*.

Allerdings kann die Schilddrüse nur dann das gesamte zugeführte Jod in sich konzentrieren, wenn seine Menge klein ist. Denn die Schilddrüse hat zwar große „Gier“ nach Jod, doch ist ihre Gesamt-Aufnahmefähigkeit für das Element gering. Das heißt, die

Drüse kann nur kleine Mengen Jod (etwa 6 bis 7 Milligramm) speichern und verarbeiten. Die Messung der Aufnahme von Radiojod durch die Drüse wird heute an vielen Krankenhäusern zur Feststellung von Störungen des Organs in Serienuntersuchungen diagnostisch verwendet.

Auch die gefürchteten *Metastasen* (abgewanderten Zellkolonien) von *Schilddrüsenkrebsen*, die sich in den verschiedensten Organen, zum Beispiel in Knochen, weitab vom ursprünglichen Herd des Krebses absetzen und dort weiterwuchern können, werden heute oft durch ihre Fähigkeit erkannt, Radiojod zu speichern. Solche Metastasen oder Tochtergeschwülste behalten nämlich oft trotz ihrer Entartung bis zu einem gewissen Grade die Funktion ihres Ursprungsorgans bei. Nach Verabreichung von Radiojod findet man dann mit dem Zählrohr von der Körperoberfläche aus die Orte der Metastasen.

Auf Grund seiner Notwendigkeit für den tierischen Organismus gehört das Jod in dem auf S. 192 genannten Sinne zu den Spurenelementen. Ein anderes für Tier und Mensch unentbehrliches Spurenelement ist das *Kobalt*. So brauchen Kühe zum Gedeihen mindestens 1 Teil Kobalt in 10 Millionen Teilen Futter. Auf einigen Böden Australiens und anderer Länder finden die Tiere dieses Element nicht, so daß dort Düngung mit Kobaltsalzen erforderlich ist. Der Stoffwechsel dieser winzigen Mengen Kobalt wurde mit Hilfe von Radiokobalt verfolgt, da wieder nur so die erforderliche Empfindlichkeit des Nachweises erreicht wird. Es ergab sich, daß das Element von der Wand des Darmkanals aufgenommen wird und offenbar dort seine Funktion ausübt. Worin diese Funktion besteht, ist freilich noch nicht mit Sicherheit bekannt; vielleicht besteht eine Beziehung zu dem *Vitamin B 12*, dessen Molekül Kobalt enthält; das Fehlen dieses Vitamins kann zu bösartiger Blutarmut, der *perniziösen Anämie*, führen.

Die ebenfalls lebenswichtigen, aber in großer Menge benötigten Elemente *Phosphor* und *Kalzium* werden, wie Versuche mit den markierten Stoffen ergaben (siehe *Bildtafel* bei Seite 145) allmählich hauptsächlich dem Knochengewebe zugeführt und dort abgelagert. Die Knochen bestehen in ihrer Mineralsubstanz aus phosphorsaurem und kohlensaurem Kalk. Die *Rachitis* (englische Krank-

heit), die früher unter der Arbeiterbevölkerung der Industriegebiete sehr verbreitet war und durch Mangel an Vitamin D verursacht ist, äußert sich bekanntlich durch Mängel in der Knochenbildung. Im Einklang damit hat man an rachitischen Tieren verringerte Aufnahmegeschwindigkeit der markierten Atome durch die Knochen gefunden; wird jedoch dem Tier wieder Vitamin D verabreicht, so steigert sich die Aufnahme von Kalzium und Phosphor durch die Knochen sprunghaft.

Radium verhält sich chemisch und biochemisch ähnlich wie Kalzium, da es so wie dieses zu der Gruppe der sogenannten Erdalkali-Elemente gehört, also ihm chemisch nahe verwandt ist. Daher wird auch das Radium den Knochen zugeleitet, wird dort gespeichert — und entfaltet in ihnen seine unheimliche Strahlenwirkung. Winzige, daher unschädliche Mengen Radium finden sich allerdings auch im normalen menschlichen Körper. Denn wir alle nehmen durch Speise und Trank unvermeidliche Radiumsalze zu uns (siehe S. 66). Große Mengen Radium speicherten in ihren Körpern mehrere Mädchen, die während des Ersten Weltkrieges für ein Unternehmen in New Jersey Zifferblätter mit radioaktiver Leuchtfarbe bemalten und den Pinsel mit den Lippen befeuchteten. Sie starben alle an Knochenkrebs.

Besonders studiert hat man die Aufnahme jener Radioelemente durch den Organismus, die bei den Explosionen der *Atombomben* entstehen. Je stärker sie auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften vom Körper festgehalten werden, je strahlenempfindlicher die Organe sind, denen sie zugeleitet werden, und je größer ihre Halbwertszeit und ihre Strahlungsenergie sind, desto gefährlicher sind diese Radioelemente. Zu den bedenklichsten Spaltprodukten des Urans und des Plutoniums rechnet man das *Radiojod*, da es — in hinreichender Menge aufgenommen — die Schilddrüse zerstört, sowie das Erdalkali-Element Strontium (hier *Radiostrontium*), das ebenso wie Kalzium und Radium in den Knochen konzentriert wird und leider besonders langlebig ist (siehe S. 174).

Nicht in allen ihren chemischen Formen werden chemische Elemente vom Körper in gleichem Maße aufgenommen und gespeichert. So ist schon lange bekannt, daß zwar die löslichen *Bariumsalze* schwere Gifte sind, daß aber das unlösliche Bariumsulfat

(schwefelsaures Barium) völlig unverändert aus dem Körper wieder ausgeschieden wird. Daher kann man diesen Stoff kilogrammweise als *Kontrastmittel* bei der Röntgenuntersuchung des Magen-Darm-Traktes verwenden. In welcher Weise nun die Aufnahme eines Elements von seiner chemischen Form abhängt, läßt sich wieder sehr schön mit Hilfe der markierten Atome untersuchen. Beispielsweise hat man dem *Lecksalz*, das Spurenelemente für die Tierernährung enthält, diese Spurenelemente zu Versuchszwecken in radioaktiver Form zugemengt. Durch Radioaktivitätsbestimmung an Stuhl und Harn hat man dann festgestellt, ob die Radioelemente den Körper rasch wieder verlassen, also offenbar nicht nutzbar gemacht werden, oder ob sie im Körper verweilen. Ist das letztere der Fall, so kann man dann die einzelnen Organe gesondert auf Radioaktivität prüfen.

Nur nebenbei sei bemerkt, daß man in sehr netter Weise die Geschwindigkeit feststellen kann, mit der sich mit Schokolade überzogene *Pillen* von Heilmitteln oder dergleichen im Magen oder im Darm auflösen. Man markiert den Pilleninhalte durch ein gammastrahlendes Radioelement (Radionatrium); bei der Auflösung des Überzuges verbreitet sich die Radioaktivität, die von außen her gemessen wird, sehr rasch über den Körper.

Erforschung des tierischen Lebensraumes

Die Erforschung des „Lebensraumes“ der Lebewesen, also der äußeren Umstände, unter denen sie gedeihen können, ist der Gegenstand einer eigenen Wissenschaft, der sogenannten *Ökologie*. Der Name ist vom griechischen Wort „oikos“ abgeleitet, das „Haus“ bedeutet. Es sollen also die Verhältnisse erfaßt werden, unter denen sich ein Tier „zu Hause“ fühlen kann. Praktisch besonders wichtig ist die Ökologie von *Schädlingen*, die Pflanzen, Tieren und Menschen lästig sind oder ihnen gefährlich werden können.

Länder nördlicher Breite leiden im Sommer sehr unter den *Mücken*. So hat man in Kanada buchstäblich Millionen dieser Tiere

zum Zweck des Studiums ihrer Lebensgewohnheiten radioaktiv markiert. Dies ist leicht möglich, wenn man die Larven, die man literweise mit Sieben aus Tümpeln schöpfen kann, in eine Lösung von radioaktivem phosphorsaurem Salz bringt. Die Larven nehmen dann den Radiophosphor auf. Auch die Mücken, die sich aus den Larven entwickeln, erweisen sich noch als stark radioaktiv und können durch diese Aktivität leicht von den nicht markierten inaktiven Mücken unterschieden werden. Die „Radiomücken“ werden in Freiheit gesetzt. Nach bestimmten Zeiträumen werden in verschiedenen Entfernungen Mückenproben eingefangen und auf Radioaktivität geprüft. Es hat sich dabei gezeigt, daß die Mücken leider eine ganz erstaunliche Fähigkeit zur Ausbreitung besitzen, und zwar vor allem dann, wenn der Wind weht. Jedenfalls tragen die durch derartige Untersuchungen erworbenen Kenntnisse zur Ausarbeitung wirksamer Bekämpfungsmethoden bei. Das Verfahren ist der Markierung von Vögeln durch Beringen verwandt. Doch wäre es wohl schwer, Mücken zu beringen oder auch die beringten Mücken wiederzufinden!

Die äußerst schädlichen sogenannten *Drahtwürmer*, die Larven des *Schnellkäfers*, fressen Pflanzenwurzeln und bevölkern in manchen Gegenden jeden Hektar Boden zu Millionen. Auch sie lassen sich radioaktiv markieren, doch hat man in diesem Falle die individuelle Markierung einzelner Tiere vorgezogen. Man führt in den Körper des Tieres ein Stückchen Radiokobaltdraht ein, das durchdringende Gammastrahlung aussendet. Dann verfolgt man die verschlungenen Wege des Drahtwurms im Dunkel des Bodens von der Oberfläche aus mit Hilfe des *Geiger-Zählrohres*. Der *Ort* des Tieres wird leicht aufgefunden, weil ja genau vertikal darüber die größte Stärke der Strahlung herrschen muß; die *Tiefe*, in der sich die Larve befindet, wird aus der Strahlungsintensität berechnet, denn je tiefer sie wühlt, desto weniger Strahlung dringt durch das Erdreich durch. Auf Grund solcher Verfahren kann man herausfinden, welche Temperatur und welche Bodenfeuchtigkeit das Tier liebt, welche Nahrung es bevorzugt, und wie es sich gegen Artgenossen und andere Tiere verhält. Mit Hilfe *zweier* markierter Larven hat man zum ersten Male festgestellt, daß sie Kannibalen sind: Die zwei Maxima der Strahlung

verschmolzen beim Rendezvous zu einem einzigen Maximum, und als man die vermeintlich vorhandenen beiden Tiere ausgraben wollte, fand sich nur noch eines vor. In ähnlicher Weise kann man auch die Wege eines freundlicheren Tieres, des *Maulwurfs*, im Boden verfolgen.

Anwendung markierter Atome in Bergbau und Industrie

Bergbau

Die Anwendung der Methode der markierten Atome auf die verschiedenen Zweige der Industrie macht stürmische Fortschritte, und man kann nicht selten sogar davon sprechen, daß sie auf die Produktionstechnik revolutionierend wirkt. In manchen Fällen dienen die markierten Atome im *Industrielaboratorium* zur Aufklärung der Prozesse, die in den Fabriken vor sich gehen; in anderen Fällen werden die markierten Atome direkt zur laufenden Kontrolle des *Produktionsprozesses* in den Fabriken eingeführt.

Was die Urproduktion, also den *Bergbau*, betrifft, so sei zunächst erwähnt — obwohl es sich dabei *nicht* um radioaktive *Markierung* handelt — daß man bestimmte chemische Elemente durch ihre natürliche Radioaktivität analytisch bestimmen kann. Das trifft nicht nur auf Uran, Thorium und ihre Abkömmlinge zu, sondern auch auf *Kalium*. Dieses Element bildet in Form seiner Salze ein wichtiges Düngemittel und wird in Mitteldeutschland, im Elsaß, im Ural und in den Vereinigten Staaten im größten Maßstab bergmännisch gewonnen.

Zum Zweck der raschen, einfachen und auch hinreichend genauen Bestimmung des Kaliumgehaltes wird ein geeignetes Zählrohr mit dem gleichförmig gemahlene Kaliumsalz umhüllt. Das Salz kann das rohe Produkt sein, wie es unmittelbar im Schacht erhalten wird. Das Zählrohr zeigt dann infolge der Aktivität den Kaliumgehalt an, wobei es natürlich gleichgültig ist, welche sonstigen Bestandteile das Salz enthält. Aus der Aktivität berechnet man den Gehalt

(ausgedrückt in Prozent Kalium), indem man mit der Aktivität vergleicht, die unter den gleichen Bedingungen durch „Eichproben“ bekannten Kaliumgehaltes hervorgerufen wird. Chemische Abtrennungen, die immer langwierig und kostspielig sind, sind also überflüssig.

Die meisten Elemente, die bergmännisch gewonnen werden, sind natürlich nicht von vornherein radioaktiv. Sie können aber in vielen Fällen mit Hilfe von Neutronen *künstlich radioaktiv gemacht*, also markiert werden, und die in ihnen erzeugte Radioaktivität wird dann zu ihrer analytischen Bestimmung herangezogen. Zu den wertvollen Metallen, die sich künstlich leicht radioaktiv machen lassen, gehören zum Beispiel das *Mangan* und das *Wolfram*. Dieses überaus leistungsfähige chemisch-analytische Verfahren bezeichnet man als *Aktivierungsanalyse*.

So hat man vorgeschlagen, das Erz zur Aktivierung direkt durch einen Kanal des *Uranreaktors* hindurchzuführen und dann durch eine automatische Auslesevorrichtung, die durch ein Zählrohr gesteuert ist, die aktiven Stücke vom tauben Gestein abzusondern. Die bisher genannten Verfahren setzen natürlich voraus, daß ausschließlich das zu gewinnende Element unter den gewählten Arbeitsbedingungen nennenswerte Radioaktivität annimmt.

Wenn dies nicht der Fall ist, wenn also *mehrere* Bestandteile des Erzes durch den Einfang von Neutronen radioaktiv werden, so muß der Messung der Radioaktivität eine chemische Trennung nach den üblichen Methoden vorangehen. Dann ist natürlich die Vollautomatisierung der Bestimmung und Auslese nicht mehr möglich. Dennoch bietet auch in solchen Fällen die Aktivierungsanalyse große Vorteile, besonders den Vorteil außerordentlicher Empfindlichkeit.

(Auf Grund ihrer Empfindlichkeit hat man die Aktivierungsanalyse übrigens auch auf ganz anderen Anwendungsgebieten mit großem Erfolg eingesetzt. So kann man mit ihrer Hilfe in *Meteoriten*, selbst wenn diese nur kleine Masse haben, winzige Spuren chemischer Elemente messen. Zu diesen Elementen gehören zum Beispiel das *Gold* und die *Platinmetalle*. Aus dem Gehalt an solchen Elementen kann man dann auf die Herkunft und Entstehung dieser Boten aus dem Weltraum Schlüsse ziehen [vgl. S. 69 und S. 146].)

Hüttenwesen

Wir gehen nun vom Bergbau zur *Verhüttung* des Metalls über. Im Hüttenwesen ist die Abnutzung der *Auskleidung der Öfen* eine Frage von allergrößter technischer und wirtschaftlicher Bedeutung. In den Hochöfen zur Erzeugung des Roheisens zum Beispiel erreicht der Ofeninhalte Temperaturen von 1700 Grad. Unter allen Umständen muß vermieden werden, daß diese glutflüssige Masse mit der ungeschützten Ofenwand in unmittelbare Berührung kommt, indem sie sich durch die „feuerfeste“ Auskleidung, die aus Schamotte (gebranntem Ton bestimmter Art) besteht, hindurchfrißt. Katastrophale Schäden an dieser Wand wären die Folge, und der Hochofen müßte für lange Zeit stillgelegt werden. Daher hat man in der bisherigen technischen Praxis den Betrieb bereits lange vor Erreichung des Gefahrenpunktes unterbrochen und die Auskleidung erneuert. Dies konnte natürlich nur auf Kosten der Leistung eines Ofens während einer Betriebsperiode geschehen.

Heute führt man in die feuerfeste Auskleidung in bestimmter Entfernung von der Ofenwand „Patronen“ aus gammastrahlendem Radiokobalt ein. Der feurige Inhalt des Ofens frißt allmählich die Auskleidung ab, erreicht früher oder später das Radiokobalt und „laugt es aus“. Wann dieser Punkt erreicht ist, erkennt man leicht durch Messung des Roheisens, das beim Auslaugen radioaktiv wird, mit dem Zählrohr; andererseits nimmt die durch die Ofenwand nach außen dringende Strahlungsintensität plötzlich ab. Diese Zu- bzw. Abnahme der Intensität betrachtet man als Warnungszeichen. Man kann auch in ungleichen Entfernungen von der Ofenwand Patronen aus verschiedenen Radioelementen einsetzen, die sich durch die Art ihrer Strahlung unterscheiden, so daß sich das allmähliche Fortschreiten des Angriffs besser verfolgen läßt. Ähnliche Probleme wie beim Hochofen treten bei anderen technischen Öfen auf, beispielsweise bei den Öfen zur Herstellung von *Stahl*, von *Buntmetallen* oder auch von *Zement*.

Der durch die Hochöfen geblasene Luftstrom, der sogenannte *Wind*, der die Kohle verbrennt, das Erz zu Eisenmetall reduziert und dieses schmilzt, soll natürlich alle Teile des Ofens möglichst

gleichmäßig bestreichen. Es sollen sich keine „Taschen“ bilden, in denen die Luft hängen bleibt, also längere Zeit verhardt. Die gewünschte Gleichmäßigkeit des Windes erreicht man durch zweckmäßigen Aufbau der Beschickung. Zur Kontrolle der Windgeschwindigkeit an den verschiedenen Stellen des Hochofens hat man nun Kapseln mit radioaktivem Gas (Emanation, siehe S. 61) eingesetzt, die dann mittels kleiner Sprengladungen plötzlich geöffnet werden. Indem man hierauf die Radioaktivität des Windes an verschiedenen Stellen des Ofens und nach verschiedener Zeit (wenigen Sekunden) mißt, bestimmt man die örtlich herrschende Gasgeschwindigkeit, also das *Strömungsbild* des Gases.

Bei vielen Erzeugnissen der Technik, zum Beispiel bei *Metallen*, aber auch bei nichtmetallischen Erzeugnissen, wie bei *Salzen*, *keramischen Stoffen* oder bei *Gläsern*, ergeben sich bei Behandlung unter verschiedenen Bedingungen Änderungen der Struktur. So können beim Erwärmen Veränderungen im Gefüge auftreten, die die technisch wichtigen Eigenschaften wesentlich beeinflussen — in erwünschter oder auch in unerwünschter Richtung. Solche Veränderungen lassen sich besonders elegant nach der von *Otto Hahn* erfundenen *Emaniermethode* verfolgen. Zu diesem Zweck wird der zu untersuchende Körper mit einem geeigneten Stoff, zum Beispiel mit Radium, beladen. Es werden also in ihn, etwa in ein Salz, schon bei der Herstellung kleine Mengen eines Radiumsalzes eingemischt. Das Radium gibt durch radioaktiven Zerfall ständig gewisse Mengen Emanation ab. Dieses Gas kann durch seine Radioaktivität in dem Ausmaß analytisch erfaßt werden, in dem es durch die Poren und Ritzen des Probekörpers austreten kann. Bei Strukturänderungen des Probekörpers ändert sich nun in der Regel auch seine Porosität; infolgedessen stellt man eine entsprechende Veränderung des Austritts der Emanation, des sogenannten Emaniervermögens (EV), fest. Wenn man beispielsweise kohlen sauren Kalk (Kalkstein) allmählich erhitzt, so tritt zunächst — ohne chemische Veränderung — eine Auflockerung des Gefüges, also im Falle von radiumhaltigem Kalk eine Zunahme des EV ein. Sobald aber die Temperatur überschritten ist, bei der Kohlensäure abgegeben, der Kalk also gebrannt wird, bückt das Material zusammen (*sintert*); das EV sinkt rasch ab. Man er-

kennt also am Gang des EV den Umwandlungspunkt. Derartige Umwandlungen, die technisch sehr bedeutsam sein können, lassen sich nach der Emaniermethode auch in sehr kompliziert aufgebauten Systemen laufend verfolgen, und zwar ohne daß der Probekörper zerstört werden müßte.

Metallkunde

Eine wichtige Größe in der Metallkunde ist die *Beweglichkeit der Atome*. Beispielsweise hängt die Geschmeidigkeit (Duktilität) der Metalle, die ihre Fähigkeit bestimmt, sich zu *Blechen* walzen oder zu *Drähten* ziehen zu lassen, von jener Beweglichkeit ab. Bei dieser mechanischen Bearbeitung müssen die Atome ja offenbar neue Plätze einnehmen, also ihre Plätze wechseln. Ist die Platzwechselgeschwindigkeit ungenügend, so erweist sich das Metall als spröde. Die Platzwechselgeschwindigkeit ist durch die *Diffusion* (s. S. 19), also letzten Endes durch die Wärmebewegung der Atome bestimmt. Jedoch ist die Diffusions- und Platzwechselgeschwindigkeit der Atome in festen Körpern unvergleichlich geringer als in Gasen.

Nach den Methoden, die früher zur Verfügung standen, konnte die Diffusion eines Fremdstoffes in einem Metall eben wegen ihrer Langsamkeit nur mit großer Schwierigkeit gemessen werden. Die Diffusion der Atome in einem *einheitlichen* Metall, die sogenannte *Selbstdiffusion*, konnte aber früher überhaupt nicht bestimmt werden. Denn wie hätte man zum Beispiel eingewanderte Eisenatome von den alteingesessenen Eisenatomen unterscheiden sollen? Die Selbstdiffusion war als physikalischer Begriff schon im vorigen Jahrhundert eingeführt worden, doch hatte man damals nicht recht geglaubt, sie jemals unmittelbar messen zu können.

Nach der Methode der markierten Atome stellt man einen *Probekörper* her, in den man an dem einen Ende einen radioaktiven Stoff einführt, der mit dem Probekörper chemisch identisch sein kann (Fall der Selbstdiffusion) oder von ihm chemisch verschieden sein kann (Fall der Fremddiffusion). Dann erwärmt man auf die Temperatur, für die die Diffusionsgeschwindigkeit (Platzwechselgeschwindigkeit) bestimmt werden soll, und hält einige Stunden oder

Tage bei dieser Temperatur. Schließlich zersägt man den Probestab quer zu seiner Länge und bestimmt die Radioaktivität in den einzelnen erhaltenen Blättchen. Durch die Radioaktivität wird angezeigt, wie weit die aktiven Atome während des Versuches im Probestab vorgedrungen waren, wie groß also ihre Beweglichkeit ist.

So hat man bei der Untersuchung von Metallen gefunden, daß die Beweglichkeit der Atome im allgemeinen mit steigender Temperatur zunimmt, wie man ja auch erwarten würde. Selbst bei den höchsten Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes ist aber die Diffusion im Festkörper ein langsamer Vorgang, und die Atome wandern stets nur mit Geschwindigkeiten von Bruchteilen eines Millimeters im Tag.

Die Regel, daß Steigerung der Temperatur eine Vergrößerung der Diffusion bewirkt, kann durchbrochen werden, wenn das Metall eine Umwandlung des Kristallbaues erfährt. Beispielsweise geht Eisen bei 768 Grad in eine (nichtmagnetische) Abart über, wobei knapp oberhalb des Umwandlungspunktes eine wesentlich geringere Selbstdiffusion als unterhalb des Umwandlungspunktes beobachtet wird.

Maschinenbau

Vielfältig sind die Möglichkeiten zur Anwendung der Methode der markierten Atome auch bei der Verwendung von Metall in der *Maschinenindustrie*. Als Beispiel sei die Untersuchung des *Verschleißes* (des Abriebs) von *Motoren* genannt. Für die Güte des Metalls bzw. des Schmieröls ist es entscheidend, daß der Verschleiß des Motors während des Betriebes möglichst gering sei. Bisher mußte man die Motoren lange Zeit laufen lassen, bis der Verschleiß überhaupt geprüft werden konnte, und dann mußten die Motoren unter großem Aufwand an Arbeitskraft in Stücke zerlegt werden, die man sorgfältig ausmessen mußte. Ein teures Verfahren!

Dagegen ist die Messung radioaktiver Stoffe derart empfindlich, daß man bei Verwendung eines Motors aus radioaktiv gemachtem Metall schon nach wenigen Minuten Laufzeit die vom Öl aufgenommenen Metallsplitterchen durch deren Radioaktivität nachweisen

kann. Man kann daher innerhalb kürzester Zeit erkennen, wie groß der Abrieb ist. Die durch den Metallstaub bedingte Radioaktivität kann auch *laufend* gemessen werden, indem man das Öl nicht nur durch den Motor, sondern auch durch eine Rohrleitung zirkulieren läßt, die am Meßgerät vorbeiführt. Das Metall kann in einfacher Weise zum Beispiel dadurch radioaktiv gemacht werden, daß man den fertigen Motor den Neutronen eines Uranreaktors aussetzt.

Bei der Untersuchung von Reibungsvorgängen zwischen Metallflächen mit Hilfe der Radioaktivität kann man auf Grund der enormen Empfindlichkeit des Nachweises der radioaktiven Stoffe selbst den Übergang der kleinsten Metallmengen von einer reibenden Fläche zur anderen feststellen. Die Feststellung gelingt sogar dann (man erinnere sich an die Besprechung der Selbstdiffusion!), wenn die beiden reibenden Flächen aus dem *gleichen Metall* bestehen. Man findet also beispielsweise den Stoffübergang von einer Eisenoberfläche auf eine zweite Eisenoberfläche, indem man die eine Oberfläche radioaktiv markiert, die andere aber nicht. Der für das Verständnis der Reibungserscheinungen sehr wichtige Nachweis eines solchen Übergangs gelingt natürlich nach keiner anderen Methode.

Auch der Abrieb von *Drahtziehdüsen* aus Hartmetall läßt sich nach Markierung der Düse rasch und leicht messen. In diesem Falle bedient man sich zur Messung des abgeriebenen Radioelements gerne der *Radioautographie*. Man preßt also den gezogenen Draht gegen einen Photofilm und bestimmt dessen Schwärzung durch die Strahlen. Man hat gefunden, daß der Abrieb des eigentlichen *Hartmetalls* (Wolframkarbid) in der Regel stoßweise erfolgt, daß also immer wieder winzige Stückchen des spröden Hartmetalls aus der Düse ausbrechen. Dagegen wird die zähe kobalthaltige Masse, in der das Hartmetall eingebettet ist, gleichmäßiger abgenützt.

Übrigens läßt sich auch der Verschleiß weicherer, nichtmetallischer Körper nach analogen Verfahren messen. Zur Bestimmung der Abnutzung von *Autoreifen* muß man nicht mehr Versuchswagen wochenlang viele tausend Kilometer fahren lassen. Man markiert den Kautschuk radioaktiv und mißt die abgeriebene Menge nach ganz kurzer „Fahrt“ auf einem Prüfstand. Auch dieses Verfahren bringt offenbar enorme Ersparnisse mit sich.

Beim *Polieren von Metallen* hinterbleiben oft feine Kratzer, die dort störend wirken, wo es auf äußerste Glätte des Metalls ankommt. Diese Kratzer kann man leicht auffinden, indem man das Metall mit einer radioaktiven Paste einreibt, die Paste gut abwischt, und dann das Metall gegen eine Photoplatte preßt, also wieder eine Radioautographie herstellt. Nur an den Plätzen der Kratzer wird die Platte geschwärzt.

Strömungsprobleme

Undichtigkeiten, zum Beispiel in unterirdischen *Kabelleitungen*, werden in höchst empfindlicher Weise festgestellt, indem man ein radioaktives Gas oder eine radioaktive Flüssigkeit durch die Kabel preßt. Die Strahlung — am besten Beta-Strahlung — darf nur wenig durchdringend sein. Dann fährt man mit dem Zählrohr das Kabel entlang und stellt fest, ob irgendwo Radioaktivität an der Außenseite auftritt. Aktivität zeigt an, daß aktive Substanz durch die Kabelhülle hindurchtreten konnte, daß diese also undicht ist.

In der *Erdölindustrie* muß ein und dieselbe Ölförderung oft nacheinander für *verschiedene Ölsorten* verwendet werden, zum Beispiel für Benzin und für Dieselöl. Man muß nun immer wissen, welcher Teil der Leitung mit dem einen und welcher Teil mit dem anderen Öl gefüllt ist, wie weit also das nachkommende Öl schon vorgedrungen ist. Früher mußte man das Öl an verschiedenen Stellen abzapfen und analysieren. Heute gelingt die Auffindung der Grenzfläche zwischen den Ölsorten mühelos von außen, indem man die erste Portion des nachfolgenden Öls durch einen Gammastrahler, zum Beispiel Radiokobalt, markiert. Dieser wird in Form einer geeigneten chemischen Verbindung im Öl aufgelöst oder aufgeschlämmt. Auch die Lokalisierung des metallenen *Schabers* (des sogenannten *Molches*), den man zum Zweck ihrer Säuberung von Zeit zu Zeit durch die Ölleitung treiben muß, macht Schwierigkeiten, wenn der Schaber selbst stecken bleibt. Bisher mußte man unter Umständen die ganze Länge der Leitung abklopfen. Ohne weiteres gelingt die Auffindung nach radioaktiver Markierung des Schabers.

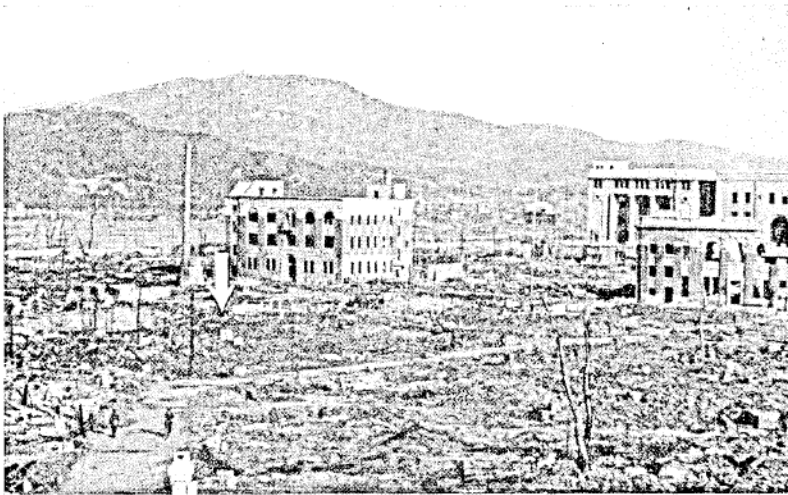
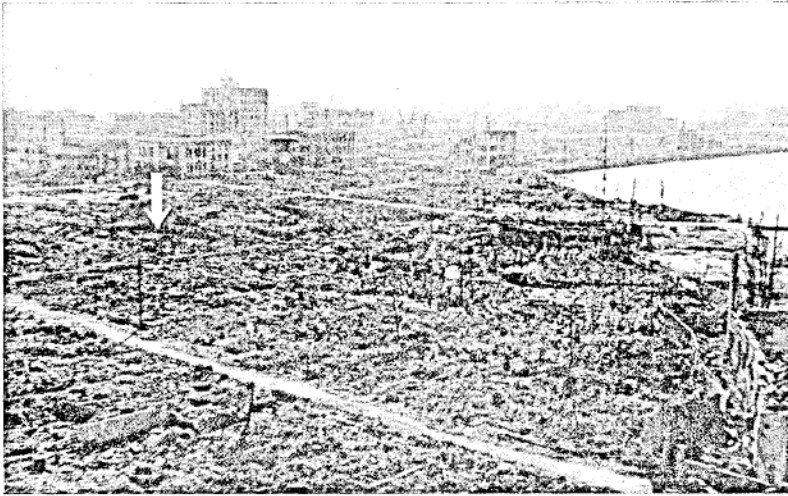
Die *Strömung des Wassers* innerhalb von Bergmassiven, im Sumpfgelände oder auch in den Wasserläufen industrialisierter Gebiete läßt sich durch die Verfolgung des Weges von Radioelementen bestimmen, die in den Gewässern aufgelöst werden. Solche Untersuchungen hat man zum Beispiel in den stark verschmutzten Wasserläufen und -behältern des Ruhrgebietes durchgeführt. Die Bestimmung der Radioaktivität ist empfindlich und gelingt auch in Gegenwart beliebiger Verunreinigungen des Wassers. Man muß allerdings darauf achten, daß die radioaktive Verbindung nicht etwa durch den Erdboden gebunden (absorbiert) wird.

Anwendung der Radioaktivität auf Regeltechnik und Radiographie

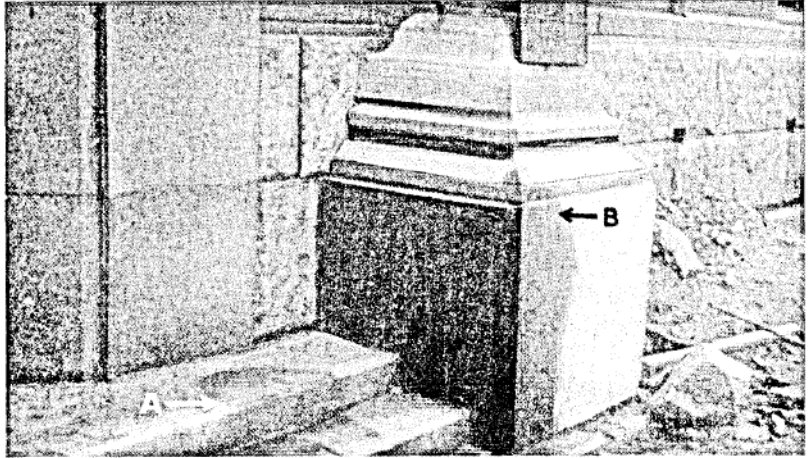
Regeltechnik

Sehr sinnreich ist ein Verfahren zur automatischen laufenden Messung der *Schneehöhe* an schwer zugänglichen Orten, zum Beispiel im Gebirge. Die rechtzeitige und verlässliche Kenntnis dieser Schneehöhe ist für die Betriebsplanung der Wasserkraftwerke im Tale wichtig. Man vergräbt nun in den Bergen Gammastrahlenquellen (Kobalt) und bringt in gewisser Höhe über dem Boden automatische Meßgeräte an. Die Strahlung wird mit Hilfe von Blei zu einem dünnen Strahlenbündel ausgeblendet, das das Meßgerät trifft. Die Intensität der Strahlung wird um so mehr geschwächt, je mehr Schnee im Strahlengang liegt. Die Anzeige des Meßgeräts ist jedoch von der bekanntlich äußerst veränderlichen Packungsdichte des Schnees fast unabhängig. Das Meßgerät ist mit einem selbsttätigen Kurzwellen-Radiosender verbunden, der die Schneehöhe ständig ins Tal funkt.

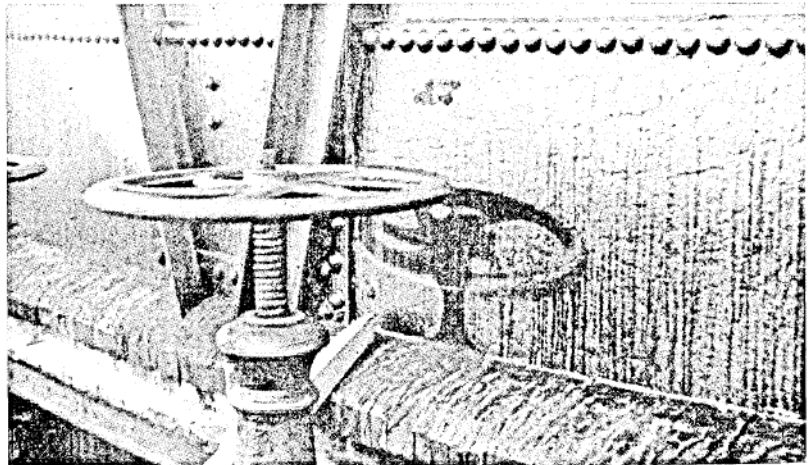
Durch Beobachtung des Ausmaßes, in dem Strahlungen verschluckt (oder auch zurückgeworfen, reflektiert) werden, lassen sich Untersuchungen von *Baugründen* durchführen, die Dichte und der Wassergehalt des Erdreiches feststellen. Solche Verfahren gewinnen auch beim *Straßenbau* Bedeutung.



Verwüstungen nach dem Abwurf der amerikanischen Atombombe auf die japanische Stadt Hiroshima und ihre Zivilbevölkerung. — Der weiße Pfeil bezeichnet den Ort unterhalb der Explosionsstelle.



In Hiroshima wurde noch auf 200 Meter Entfernung vom Explosionszentrum polierter Granit durch die Glutstrahlung aufgerauht. Bei A und B war der Granit durch die Körper von Menschen geschützt worden, die dort gesessen bzw. gestanden waren.



Wirkung der Hitzestrahlung bei der Atombombenexplosion über Hiroshima

Das eiserne Rad wirft auf die dahinterliegende Wand eine Art permanenten Schattens: Wo die Wand nicht durch das Rad geschützt war, ist der Anstrich ausgebleicht.

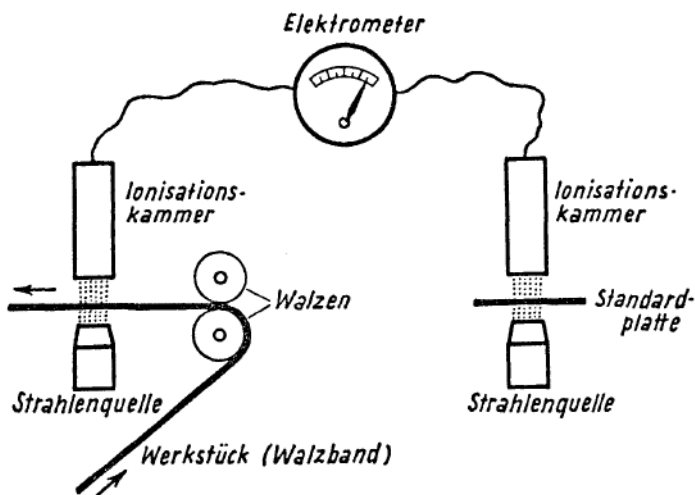


Abb. 26

Kontrolle der Dicke eines Werkstückes (hier eines Walzbandes) durch Strahlen während der Produktion

Die durch das Band hindurchtretende Strahlung wird um so mehr geschwächt, je dicker das Band ist. Die tatsächliche Schwächung wird mit der Schwächung durch ein Normalband (Standardplatte) verglichen. Ist die Schwächung zu groß oder zu klein, so liefert die Ionisationskammer über dem Band im Verhältnis zu jener über der Standardplatte einen zu kleinen bzw. zu großen Strom. Das Meßgerät (Elektrometer), in dem die von den beiden gleichem Ionisationskammern kommenden Ströme gegeneinander geschaltet sind, zeigt in diesem Falle nach der einen oder der anderen Seite einen Ausschlag. Man verbessert dann die Einstellung der Walzen, durch die die Dicke des Bandes geregelt wird; diese Einstellung kann auch automatisch erfolgen.

Der *Flüssigkeitsstand* auch in geschlossenen Behältern läßt sich automatisch messen und daher regeln. Man läßt auf der Flüssigkeit, zum Beispiel dem Wasser, ein gammaaktives „Floß“ schwimmen. An der Decke des Behälters ist ein Meßgerät angebracht. Je größer die Entfernung Floß—Decke, desto geringer die Strahlungsintensität. Nach einem anderen Verfahren liegt die Strahlenquelle auf dem Boden des Behälters, so daß die Entfernung Quelle—Gerät zwar gleich bleibt, aber die Strahlung durch die Flüssigkeit je nach ihrer Steighöhe in größerem oder geringerem Maße absorbiert wird. Eine besonders scharfe Kontrolle, ob ein bestimmter Stand der Flüssigkeit unter- oder überschritten wird, ergibt sich schließlich dadurch, daß die

Strahlenquelle und das Meßgerät an gegenüberliegenden Stellen der Seitenwand des Gefäßes in gleicher Höhe angebracht sind. Die auftreffende Strahlung wird dann plötzlich überaus stark geschwächt, sobald die Flüssigkeit diese Höhe überschreitet.

Die radioaktive Strahlung eignet sich ausgezeichnet zur Qualitätskontrolle bei bestimmten industriellen Verfahren, bei denen *bandförmiges Gut* erzeugt wird. So will man bei der kontinuierlich erfolgenden Herstellung von *Blech, Papier, Kunststoffolien* usw. *gleichförmige Dicke* einhalten. Eine laufende Dickenmessung war früher, wenn überhaupt, nur mit komplizierten und kostspieligen Geräten möglich. Man kann nun unterhalb des zu untersuchenden Bandes, nachdem es die erzeugende Maschine verläßt, eine Strahlenquelle, oberhalb des Bandes ein Meßgerät anordnen. Je nach dem Verwendungszweck — also der Dicke und Natur des Bandes — erweist sich Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung als günstig; die durchdringende Kraft der Strahlen nimmt in dieser Reihenfolge zu. Das Gerät zeigt die Absorption der Strahlen durch das Band oder auch direkt die dieser Absorption entsprechende Dicke des Bandes an. Ein besonderer Vorteil des Verfahrens liegt darin, daß das Band — anders als bei älteren Verfahren — durch das Meßgerät nicht berührt wird. Eine Anordnung ist in *Abb. 26* schematisch dargestellt. Auf Grund der Anzeige durch das Gerät wird der Produktionsprozeß gesteuert, also durch Einstellung der Maschine die Dicke geregelt; diese Steuerung von Walzwerken, Papiermaschinen usw. kann auch selbsttätig erfolgen.

Durch Geräte verwandter Art wird lediglich die *Dicke eines Belags* auf einer bandförmigen Unterlage erfaßt. Zu diesem Zweck wird nicht die durch das Band durchtretende Strahlung, deren Intensität ja durch Unterlage und Belag bestimmt wird, sondern die vom Band zurückgeworfene (reflektierte) Strahlung gemessen; deren Intensität hängt, wie die Physiker gefunden haben, von der materiellen Zusammensetzung des reflektierenden Stoffes, daher von der Dicke des Belags ab. Auf diese Weise mißt man heute allgemein in den großen Blechwalzwerken die Dicke des teuren Zinns auf der billigen Eisengrundlage bei der Herstellung des *Weißblechs*.

Grobe Messungen der Strahlenabsorption genügen zur Überprü-

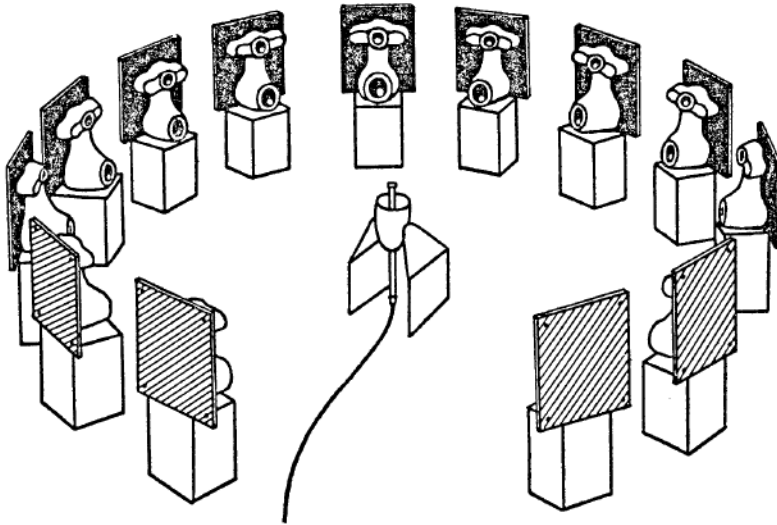


Abb. 27

Radiographie von Werkstücken

Die Gammastrahlenquelle (Radiokobalt) befindet sich in der Mitte, so daß eine größere Anzahl von Stücken gleichzeitig durchleuchtet und auf Fehler geprüft werden kann. Hinter jedem Stück befindet sich ein vor Licht geschützter Photofilm.

fung, ob selbsttätig abgefüllte *Packungen* das volle Maß an Gut enthalten, ob zum Beispiel Pfefferdosen oder Zigarettenschachteln richtig gefüllt sind. Schließlich läßt sich durch Strahlenmessung kontrollieren, ob beim *Zusammenbau von Maschinen* alle Bestandteile vorschriftsmäßig zusammengefügt sind. Man schickt dazu ein gut ausgeblendetes Gammastrahlenbündel in einer bestimmten Richtung durch das Erzeugnis und bestimmt die Intensität des hindurchgetretenen Bündels.

Radiographie

Im Rahmen der *industriellen Radiographie* werden Metallstücke mit energiereichen, durchdringenden Strahlen *durchleuchtet*. Dabei machen sich schadhafte Stellen, also Risse, Hohlräume, mangel-

hafte Schweißnähte usw., durch verminderte Absorption bemerkbar. Daher wird ein hinter dem Prüfstück angeordneter Photofilm in der Richtung schadhafter Stellen stärker geschwärzt (*Abb. 27*). Für dünnes Metall kann man vielfach die meist relativ energiearme *Röntgenstrahlung* einsetzen, für dicke Stücke muß aber in der Regel die besser durchdringende *Gammastrahlung* verwendet werden.

Ein weiterer wichtiger Vorteil der radioaktiven Strahlenquellen liegt darin, daß sie sich ohne Umstände transportieren lassen und keinen elektrischen Anschluß benötigen. So durchleuchtet man mit den Radioelementen die Druckrohrleitungen der Wasserkraftwerke im Gebirge.

Früher benützte man für die *Gamma-Radiographie* das *Radium*. Heute zieht man zumeist das weit billigere, konzentriertere und handlichere *Radiokobalt* vor. Es ist billiger — tausendmal billiger —, weil die kostspielige Abtrennung des Radiums aus dem Erz und der Profit der monopolistischen Bergwerksgesellschaften entfallen. Das an sich wohlfeile Kobalt muß bloß im Reaktor bestrahlt (aktiviert) werden. Konzentrierter ist die Strahlenquelle, weil das Kobalt sich erstens überhaupt sehr stark aktivieren läßt und zweitens in kompakter, dichter Metallform verwendet wird. Dagegen läßt sich das Radium auf Grund seiner chemischen Natur praktisch überhaupt nicht in die Metallform überführen und muß daher als Salz (beispielsweise als Chlorid) verwendet werden. Das Salz wird in mühsamer und gefährlicher Arbeit in dichtschießende Metallkapseln gepreßt, bleibt aber selbst dann noch locker. Aus diesen Gründen können Kobaltquellen je Raumeinheit hundertmal größere Aktivität besitzen als Radiumquellen. Sie stellen also in besserer Annäherung die erwünschten *punktförmigen Quellen* dar, die bei der Radiographie scharfe Bilder ergeben. Dahin wirkt auch der Umstand, daß die Gammastrahlung des Kobalts in bezug auf ihre Energie und daher ihre durchdringende Kraft einheitlicher ist als jene des Radiums. Schließlich ist das Kobalt insofern handlich, als man ihm schon *vor seiner Aktivierung* jede beliebige Form — zum Beispiel Draht statt Perle — verleihen kann. Gegenüber diesen gewaltigen Vorteilen spielt der Umstand keine Rolle, daß die Radioaktivität des Kobalts schneller

abklingt als jene des Radiums, nämlich mit einer Halbwertszeit von 5·3 Jahren.

Für Sonderzwecke verwendet man statt des Radiokobalts andere künstliche Gammastrahler, nämlich *Radiotantal*, *Radioiridium*, *Radiocäsium* und *Radiothulium*, die sämtlich kurzlebiger sind. Das Radiocäsium ist ein häufiges Spaltprodukt des Urans, fällt also unter allen Umständen beim Betrieb von Reaktoren an, während Tantal, Iridium und Thulium ebenso wie Kobalt durch Bestrahlung der inaktiven Elemente aktiviert werden müssen. Die Gammastrahlung des Thuliums ist besonders weich und eignet sich daher zur Durchleuchtung dünnen Stahls oder von Leichtmetall.

Einwirkung radioaktiver Strahlen auf Materie

Entladung von Elektrizität

Bei den bisher besprochenen Verwendungsarten der Radioelemente dient die Strahlung entweder zum *Auffinden der radioaktiven Atome* (Methode der markierten Atome), oder es wird die *Strahlungsschwächung* durch Materie für Meß- und Regelzwecke ausgenützt. Nun sollen einige technische Gebiete kurz behandelt werden, auf denen man mit Hilfe der Strahlen *Veränderungen in der Materie* hervorruft, also in irgendeiner Weise die Energie der Strahlen zu ihrer Beeinflussung ausnützt.

In großem Maßstab wird die radioaktive Strahlung zur *Zerstörung unerwünschter elektrischer Ladungen* verwendet, die bei manchen technischen Verfahren Verluste und Gefahren mit sich bringen. Überall dort, wo isolierende Stoffe mit beträchtlicher Geschwindigkeit gegen andere Stoffe reiben, kommt es zur Bildung von *Reibungselektrizität*, also zum Auftreten sogenannter elektrostatischer Ladungen.

So können sich in schnell laufenden *Druckerpressen* Aufladungen ergeben, die das Papier aus der vorgesehenen Bahn ablenken. Auch das Aufstapeln von Papier wird durch elektrische Aufladung erschwert. Ähnliche Probleme treten in der Kautschuk- und in der Kunststoffindustrie auf. Vor allem aber in der *Textilindustrie* machen

sich elektrische Aufladungen unangenehm bemerkbar; die Störungen sind bei der Verarbeitung von Kunstfasern wie Nylon und Azetatseide besonders ernst. Beträchtliche Ladungen ergeben sich beim Scheren und Krempeln sowie beim Weben, wodurch die einzelnen Fasern auseinandergetrieben werden. Auch werden geladene Fasern durch gut leitende Stoffe angezogen und festgehalten. Schließlich nehmen geladene Fasern Staub auf, der an ihnen haftet und oft nicht einmal durch Waschen zu entfernen ist.

Elektrische Aufladungen können auch zur *Funkenbildung* führen, was bei etwaiger Anwesenheit explosiver Gasgemische eine große Gefahr darstellt. So treten in Krankenhäusern durch die Reibung von Gummirädern, Gummischürzen, Kunststoffolien usw. an Operations- und Instrumententischen leicht starke Ladungen auf, die dann den Dampf von Narkosemitteln zünden können. Schwere Explosionen sind die Folge. Auch bei der industriellen Förderung brennbarer staubförmiger Güter, zum Beispiel von Mehl, besteht Explosionsgefahr.

Zur Beseitigung dieser elektrischen Ladungen ordnet man an den gefährdeten Orten Alpha- oder Betastrahlenquellen an, die die Luft ionisieren (siehe S. 62). Die Ionen, also elektrisch geladene Atome oder Moleküle, werden vom geladenen Gut oder Gerät angezogen, soweit sie Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens tragen, und wirken neutralisierend. Die Wirkung der Alphastrahlen erstreckt sich wegen ihrer geringen Reichweite nur auf die unmittelbare Umgebung der Quelle, ist aber dort sehr stark, während die Betastrahlen in größere Entfernungen vordringen und wirken.

Die Erzeugung von Ionen wird in anderen Fällen dazu ausgenützt, in Gasen erwünschte elektrische *Entladungen*, die sonst oft mit einer gewissen Verzögerung nach Anlegen einer Hochspannung auftreten, augenblicklich *auszulösen*. Indem die Ionen durch das Spannungsgefälle beschleunigt werden und den entgegengesetzt geladenen Polen zueilen, stoßen sie an Gasmoleküle an und ionisieren diese durch ihren Anprall. Sie schaffen derart weitere elektrische Ladungen, die ihrerseits wieder durch die Spannung beschleunigt werden usw. Schließlich kommt es zur Ausbildung des Funkens. Man erinnere sich in diesem Zusammenhang an die Wirkungsweise des *Geiger-Zählrohrs* (S. 64), in dem ja auch eine Vervielfachung der Zahl der Ladungs-

träger (Ionen und Elektronen) durch den Aufprall auf die Moleküle und Atome des Zählrohr-Füllgases stattfindet. Technische Anwendung hat die Auslösung von Entladungen außer im Zählrohr bei der Betätigung gewisser Arten von *Radoröhren*, *Glimmlichtlampen* und *Leuchtstoffröhren* gefunden. Auch das Überspringen von Funken in *Zündkerzen* wird durch radioaktive Strahlung erleichtert.

Erzeugung von elektrischem Strom und von Licht

Zur Erzeugung elektrischer Ladungen benützt man die Radioelemente in den neuerdings beschriebenen, grundsätzlich sehr interessanten Batterien, in denen die *Energie der radioaktiven Strahlung* in *Energie des elektrischen Stromes* umgewandelt wird. Solche Batterien arbeiten auf Grund des für die Verstärkertechnik wichtig gewordenen *Transistorprinzips*, das hier nicht näher erklärt werden kann. In eine geeignete Muttersubstanz, die aus den Elementen Silizium oder Germanium bestehen kann, sind radioaktive Atome eingelagert. Beispielsweise eignen sich hiefür Atome des langlebigen Radiostrontiums. Die Betastrahlung des Radioelements wird in der Masse der Muttersubstanz absorbiert, wobei in ihr eine ungleichmäßige elektrische Aufladung stattfindet. Die ungleichmäßige Aufladung entspricht natürlich einer gewissen Trennung elektrischer Ladungsträger und führt zu einem „Bestreben“ des Ausgleichs der Elektrizität, also zum Fließen eines elektrischen Stromes. Freilich werden bisher nur wenige Prozent der Strahlungsenergie ausgenützt, und die Stromleistung eines Gerätes liegt in der Gegend von bloß einem Mikrowatt, also einem millionstel Watt. Kraftwerke wird man nach diesem Prinzip voraussichtlich nie betreiben, aber das Gerät, das keinerlei Wartung braucht, kann als dauernde und unabhängige Stromquelle für Vorrichtungen sehr geringen Strombedarfes dienen. In Betracht kommen beispielsweise selbstregistrierende Meßgeräte an schwer zugänglichen Orten, etwa in der Arktis oder auf Berggipfeln.

Die Energie der radioaktiven Strahlen kann auch in Energie *sichtbaren Lichtes* verwandelt werden. Die *selbstleuchtenden Zifferblätter* von Uhren sind ja schon seit Jahrzehnten bekannt. Das Licht

entsteht in der sogenannten Leuchtmasse, einer besonders zusammengesetzten salzartigen Substanz, die auch als „Phosphor“ (griechisch: Lichtträger) bezeichnet wird, aber mit dem Element gleichen Namens nichts zu tun hat. Der Leuchtmasse ist als Energiequelle gewöhnlich ein wenig Radium zugemengt. Die Alphastrahlen des Radiums werden in der Leuchtmasse gebremst und geben dabei ihre Energie an sie ab. Die Energie bewirkt zum Teil Erwärmung, wird aber zum anderen Teil als Lichtenergie wieder ausgesendet. Wenn man eine leuchtende Ziffer des Nachts an das gut ausgeruhte Auge heranbringt, bemerkt man sehr schön die einzelnen Lichtblitze, die beim Auftreffen einzelner Alphateilchen auf die Leuchtmasse entstehen — ein höchst anschaulicher Beweis für die atomistische Struktur der Materie!

In letzter Zeit ist man dazu übergegangen, derartige Lichtquellen durch *künstliche Radioelemente* mit Energie zu versorgen. Soll die Energie statt durch Alphastrahlung (wie beim Radium) durch Betastrahlung (wie bei den meisten Produkten der Uranspaltung) geliefert werden, so muß man auf die größere Reichweite dieser Strahlung Rücksicht nehmen. Man muß also dickere Schichten von Leuchtmasse anwenden, so daß die Strahlen praktisch vollständig von ihr verschluckt werden. Die Verwendung dickerer Schichten von Leuchtmasse ist aber natürlich nur dann sinnvoll, wenn die Masse so gut durchsichtig ist, daß das aus dem Inneren kommende Licht auch wieder austreten kann. Dies ist bei bestimmten Leuchtmassen auf Grundlage wasserhellen Kunstharzes der Fall. Als Energiequelle kann der Radiowasserstoff (das Tritium) dienen, der statt gewöhnlichen Wasserstoffs unmittelbar chemisch in das Kunststoffmolekül eingebaut wird. Man kann auf diese Weise ohne allzu große Kosten unvergleichlich größere Gegenstände als die Ziffern der Uhren selbstleuchtend machen.

Durchführung chemischer Reaktionen

Auch *chemische Reaktionen* lassen sich durch radioaktive Strahlen auslösen, einleiten oder sogar zu Ende führen. Dieses Anwendungsgebiet befindet sich größtenteils noch im ersten Stadium der Er-

forschung, doch sind in zweierlei Hinsicht schon anwendungsreife technische Verfahren ausgebildet worden.

Man hat bestimmte technische Eigenschaften von *Kunststoffen* (Kunstharzen, plastischen Massen) durch Bestrahlung im Uranreaktor in interessanter Weise verändern können. Die Bestrahlung macht den sehr wichtigen Kunststoff Polyäthylen (Polythen), der sich durch große Festigkeit und elektrische Isolierkraft auszeichnet, elastischer, formbeständiger, wärmebeständiger und zerreifester. Man hat also die besonders in der Wärme vorliegende Gefahr „plastischer Verformung“, des Fließens bei mechanischer Beanspruchung, herabsetzen können. Derartig behandeltes Polythen kommt als „Irrathen“ (lateinisch: irradiare = bestrahlen) in den Handel. Mit bestrahltem Polythen umhüllte *Starkstromkabel* können zweimal so viel Strom führen wie gewöhnliche Kabel, ohne daß die Steigerung der Temperatur gefährlich würde! Auch bei anderen Kunststoffen sind günstige Wirkungen erzielt worden.

Kautschuk läßt sich durch Bestrahlung ähnlich wie durch Behandlung mit Schwefel *vulkanisieren*. Dabei werden die relativ sehr langen Fadenmoleküle des Kautschuks, die sich ursprünglich ziemlich frei schlängeln können, an einigen Stellen durch „Atombrcken“ miteinander verknüpft und gewissermaßen vernäht, so daß Formbeständigkeit und Elastizität auch dieses Stoffes verbessert werden. Die Brücken bestehen im Falle der üblichen Vulkanisation aus Schwefelatomen, bei der Strahlenvulkanisation bestehen sie offenbar aus Atomen oder Atomgruppen, die durch die brutale Einwirkung der energiereichen Strahlen aus dem Kautschuk selbst herausgeschlagen werden.

Bekämpfung von Schädlingen

Man kann die große Empfindlichkeit der *belebten Substanz* gegen radioaktive Strahlen, die einerseits zu den Schrecken des Atomkrieges beiträgt, andererseits in mannigfaltiger Weise technisch ausnützen. Auch der Schädigung der belebten Materie liegen natürlich letzten Endes chemische Reaktionen — in diesem Falle biochemische Reaktionen — zugrunde. Man kann *Lebensmittel* und *Heilmittel*

durch Strahlen *kalt sterilisieren* und Gegenstände aller Art *desinfizieren*. Infolge der guten Durchdringungskraft der Strahlen kann man mit ihnen auch dicke Stücke oder geschlossene Behälter und Packungen behandeln. Meist wird Gammastrahlung verwendet, doch ist unter Umständen auch Betastrahlung brauchbar.

Freilich ist die allgemeine Erfahrung zu berücksichtigen, daß Organismen gegen die Strahlen um so widerstandsfähiger sind, je einfacher, primitiver sie gebaut sind. So beträgt die für Bakterien tödliche Strahlendosis ein Mehrhundertfaches, für Viren gar ein Mehrtausendfaches der für Säugetiere oder für den Menschen tödlichen Dosis. Insekten, Würmer und andere niedere Tiere stehen in der Mitte. Allerdings ist die *Tötung* der Schädlinge zumeist nicht notwendig, sondern ihre *Sterilisierung* kann genügen. Man muß sie also nur der Fortpflanzungsfähigkeit berauben, was schon mit viel geringeren Strahlungsdosen möglich ist.

Daß die Behandlung auf *kaltem Wege* erfolgt, kann bedeutsam sein. Durch Erhitzen werden viele Heilmittel zersetzt und Lebensmittel verlieren Vitamine. Freilich muß man sich durch gründliche Versuche davon überzeugen, daß die Strahlen das Gut nicht schädigen. So wird man bestrahlte Lebensmittel zuerst an Versuchstiere verfüttern. Radioaktiv wird das Gut natürlich nicht, denn die verwendeten Beta- und Gammastrahlen führen unter den gegebenen Umständen keine Umwandlungen von Atomkernen, sondern nur chemische Veränderungen herbei. Doch ist bei *Lebensmitteln* gelegentlich das Auftreten unerfreulicher Gerüche, Geschmäcke oder Farben beobachtet worden, was natürlich nicht geduldet werden kann. Immerhin darf die Zuversicht ausgesprochen werden, daß durch zweckmäßige Vorgangsweise eine ungünstige Beeinflussung der Lebensmittel vermieden werden kann. Zu den für die Kaltsterilisation mit Strahlen geeigneten *Heilmitteln* gehören Penicillin und Cortison. Unter den *Lebensmitteln* hat man die Bestrahlung von Fleisch, Fisch, Obst, Gemüse, Milch und Eipulver studiert.

Eine besonders günstige Wirkung der Strahlen besteht darin, daß gewisse Lebensmittel an der Entfaltung unerwünschter Lebensprozesse gehindert werden: So wird das *Austreiben der Kartoffeln* bei der Lagerung durch vorherige Bestrahlung unterbunden; be-

strahlte Kartoffeln können 1 ½ Jahre lagern. Auch *Zwiebeln* lassen sich haltbar machen. Wie weit alle diese Verfahren wirtschaftlich sind, ist noch nicht entschieden.

Zu den *Schädlingen*, die bekämpft werden müssen, gehören öfters auch höher organisierte Tiere. In den Vereinigten Staaten leiden 25 Millionen Menschen an *Trichinen*, die sie sich durch den Genuß ungenügend gekochten Schweinefleisches zugezogen haben. Die unangenehme und in manchen Fällen gefährliche Trichinose pflanzt sich immer weiter fort, weil viele Schweine mit städtischen Abfällen gefüttert werden, unter denen sich auch Stücke von trichinösem Fleisch befinden. Eine obligatorische Fleischschau gibt es in Amerika nicht, und die Schweinezüchter wollen das Schweinefutter nicht abkochen, weil dabei Kosten entstehen. Gegen die Krankheit gibt es kein Mittel — in wessen Fleisch die Würmer sich eingenistet haben, der trägt sie sein Leben lang mit sich herum. Es ist nun vorgeschlagen worden, alles auf den Markt gebrachte Schweinefleisch mit Gammastrahlen (Radiokobalt) zu behandeln, wobei die Trichinen ihre Fähigkeit zur Fortpflanzung verlieren. Freilich wird die Einführung auch dieser Behandlung als eine Kostenfrage betrachtet, die noch nicht gelöst ist.

Auch für andere Schädlinge hat unsere Zivilisation paradiesische Lebensbedingungen geschaffen, so daß sie alljährlich außerordentlich große Werte vernichten. Zu ihnen gehören unter anderen die *Baumwollkäfer*, die *Getreidekäfer* und die *Borkenkäfer*. Bisher war zum Beispiel die Vernichtung der Borkenkäfer in Gegenständen aus Holz, also die Desinfektion des Holzes, unmöglich. Heute können alle diese Schädlinge durch Gammastrahlen abgetötet oder doch wenigstens sterilisiert werden. So hat man beispielsweise kostbare hölzerne Altäre aus dem Mittelalter gerettet.

Bei allen hier beschriebenen Strahlenwirkungen, ob sie nun der Vergütung der Kunststoffe, der Desinfektion oder der Sterilisierung dienen, kommt es natürlich auf die Art der Strahlenquelle wenig an. Wesentlich ist, daß die Quelle reichlich und billig sei. Am besten eignen sich daher die beta- und die gammaaktiven *Spaltprodukte des Urans*. Man erhält diese ja auf jeden Fall in ungeheuren Mengen bei der Umlösung (Reinigung) des Urans und der Gewinnung

des Plutoniums aus den Reaktoren, und sie müssen bisher unter erheblichen Kosten unschädlich gemacht werden (siehe S. 127). Für die hier besprochenen Anwendungen ist keinerlei chemische Aufarbeitung oder Auftrennung dieser Spaltprodukte, die teuer wäre, erforderlich. Man kann ihre Mischung verwenden, so wie sie erhalten wird. Natürlich klingt dann die Aktivität nicht nach einem einheitlichen Zerfallsgesetz ab, vielmehr zerfallen zuerst vorwiegend die kurzlebigen und erst später die verbleibenden langlebigen Spaltprodukte. Die durchschnittliche Halbwertszeit der Mischung nimmt also im Laufe der Zeit ständig zu.

Die Radioaktivität in der Medizin

Vorbeugung und Diagnose

Die Verwendung der *markierten Atome* in der tierischen und menschlichen Physiologie wurde schon auf den Seiten 193 bis 198 beschrieben. Es wurde bereits hervorgehoben, daß durch Stoffwechseluntersuchungen krankhafte Zustände des gesamten Organismus oder seiner einzelnen Organe erkannt werden, daß also in dieser Weise *medizinische Diagnosen* gestellt werden können. Hier soll nun über Verfahren berichtet werden, durch die die Radioaktivität einerseits der *präventiven (vorbeugenden) Medizin* und *Gewerbehygiene*, andererseits der *Therapie* dienstbar gemacht werden kann.

Beispielsweise sind die Arbeiter in manchen Fabriken und Werkstätten dem giftigen *Quecksilberdampf* ausgesetzt. Man hat nun das Quecksilber versuchsweise radioaktiv markiert und die dampfhaltige Luft aus einem bestimmten Volumen in der Nähe des Arbeitsplatzes durch einen „Sammler“ abgesaugt. Dieser wird mit flüssiger Luft gekühlt, so daß sich der Dampf niederschlägt. Eine Radioaktivitätsmessung an diesem Niederschlag ergibt dann in einfachster Weise, ob die lokale Dampfkonzentration in der Atemluft des Arbeiters die Gefahrenschwelle überschreitet oder nicht. Eine Queck-

silberbestimmung nach sonstigen (chemischen) Methoden wäre nicht genügend empfindlich.

Man kann sich auch überzeugen, ob ein giftiger Stoff bei seiner technischen Handhabung durch den Körper aufgenommen wird. Derartige Versuche sind besonders mit den sogenannten *Weichmachern* angestellt worden, die in der Industrie der plastischen Massen (Kunstharze) verwendet werden. Nach radioaktiver Markierung solcher Weichmacher konnte festgestellt werden, bis zu welchem Grad sie beispielsweise durch die Haut der Hände hindurchtreten können. Zu diesem Zweck wurden die Ausscheidungen des Arbeiters auf Radioaktivität geprüft. Im Tierversuch hat man auch die Aufnahme des Weichmachers durch einzelne Organe gemessen, indem man die Radioaktivität solcher Organe bestimmt hat. Ähnliche Untersuchungen liegen über den „*Klopffeind*“ Bleitetraäthyl vor. Diese Flüssigkeit wird dem Benzin zugesetzt, um seine Klopfestigkeit zu erhöhen, und ist wegen ihres Bleigehaltes sehr zu fürchten. In diesem Falle wurde das Blei radioaktiv markiert, im Falle der Weichmacher der im Molekül enthaltene Phosphor.

In den Rahmen der Medizin, nämlich der *Gerichtsmedizin*, gehört auch der Nachweis von absichtlich herbeigeführten Vergiftungen, also von Verbrechen. Bei *Arsenvergiftungen* wandern, wie man schon lange weiß, relativ nicht unbedeutende Mengen Arsen in die Haare ein. Bestrahlt man nun Haare mit Neutronen, so wird das Arsen nach dem Prinzip der Aktivierungsanalyse (siehe S. 201) aktiviert. Es wird also Radioarsen gebildet, das dann durch seine Radioaktivität bestimmt wird. Je mehr Arsen vorhanden ist, desto größer ist — unter sonst gleichen Verhältnissen — die Radioaktivität. So kann man die Tatsache der Arsenvergiftung nachweisen und überdies aus der Verteilung des Arsens über die Länge des Haares sogar Schlüsse ziehen, zu welcher Zeit das Arsen verabreicht wurde. Unter Umständen genügt für die Bestimmung ein einzelnes Haar!

Die Erneuerung der Luft in Fabrikräumen, in denen sich übelriechende oder gar gefährliche Gase und Dämpfe ansammeln, wird geprüft, indem man ein geeignetes radioaktives Gas, z. B. Isotope von Krypton oder Xenon, einführt und dann in gewissen Abständen die in der Luft verbliebene Radioaktivität bestimmt.

Therapie

Der Verwendung der Radioaktivität in der *Therapie* ist viel Anstrengung gewidmet worden. Die wichtigste Anwendungsrichtung ist natürlich die *Zerstörung von Krebsgewebe* durch Gammastrahlung. Man stützt sich dabei auf die Erfahrung, daß Krebsgewebe oft — leider bei weitem nicht immer — gegen die Einwirkung energiereicher Strahlung empfindlicher ist als normales, gesundes Gewebe. Dies hängt damit zusammen, daß Krebsgewebe biologisch aktiv ist, sich in lebhafter Teilung befindet; lebendes Gewebe wird allgemein während der Teilung leichter geschädigt als im Ruhezustand. Man kann daher hoffen, daß bei Bestrahlung zwar das Krebsgewebe, nicht aber das umliegende, gesunde Gewebe abgetötet wird. So werden seit den Pionierarbeiten, die *Leopold Freund* noch in den neunziger Jahren in Wien durchführte, Röntgen- und Radiumstrahlung zur Krebstherapie verwendet. Die Strahlentherapie ist neben der Chirurgie noch immer die Hauptstütze unseres Kampfes gegen die furchtbare Krebskrankheit.

Seit der Erfindung des Uranreaktors wird das Radium auch auf diesem Gebiet zunehmend durch das billigere und leichter zu handhabende *Radiokobalt* verdrängt. Die Vorteile des Kobalts sind schon bei der Besprechung der industriellen Radiographie (siehe S. 212) dargelegt worden. Strahlenquellen zur Krebsbekämpfung werden damit auch kleinen Krankenhäusern erschwinglich. Selbst der Bevölkerung abgelegener Gebiete sollte also dieses wichtige Hilfsmittel der Medizin zugute kommen. Auch wird die Verwendung äußerst starker Strahlenquellen, wie sie sich für die Zerstörung tiefelegener Krebsherde eignen, wirtschaftlich möglich. Schon sind therapeutische Kobaltquellen in Betrieb genommen worden, deren Stärke mehreren Kilogramm Radium entspricht. *Abbildung 28* zeigt eine der Therapie dienende „*Kobaltkanone*“. Natürlich ist wegen der Schädlichkeit der Strahlung auch für gesunde Gewebe äußerste Vorsicht am Platz. Eine teilweise Möglichkeit, den Organismus vor Schädigungen zu bewahren, bietet die Verwendung eines sogenannten *Pendelgerätes*, wie es in *Abbildung 29* im Prinzip skizziert ist.

Interessant, aber auch schwierig zu lösen ist das Problem der

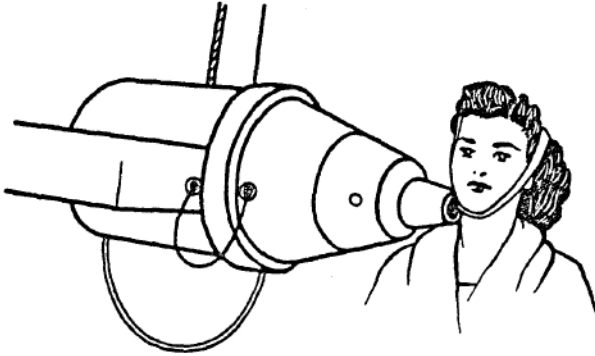


Abb. 28

Die „Kobalt-Kanone“

Sie enthält als Strahlenquelle das Radiokobalt. Die Strahlen treten durch einen von Metall umhüllten Kanal als Bündel aus. Das Strahlenbündel wird in der Medizin zur Behandlung bösartiger Geschwülste verwendet.

direkten Einführung radioaktiver Strahlenquellen in den Stoffwechsel des krebserkrankten Menschen. Die mit der Nahrung oder durch Injektion verabreichten Radioelemente wandern im Körper entsprechend ihrer individuellen chemischen Natur (siehe S. 193 ff.). Zum Beispiel wird Radiojod, wie schon hervorgehoben wurde, ebenso wie gewöhnliches Jod in einem einzigen Organ, nämlich in der Schilddrüse, angereichert. Man hat nun Patienten mit Schilddrüsenkrebs („bösartigem Kropf“) massive Dosen Radiojod eingegeben, damit das Radioelement an Ort und Stelle — und nur dort — seine zerstörende Tätigkeit entfalten kann. In manchen Fällen lassen sich so auch die *Metastasen* zerstören, die aus abgewanderten Kolonien krebserkrankter Schilddrüsenzellen bestehen, sich in anderen Organen festgesetzt haben, aber noch eine mehr oder minder ausgeprägte Fähigkeit zur Speicherung von Jod behalten haben. Ähnlich kann zum Beispiel Radiophosphor in den Knochen zur Wirkung kommen, da diese phosphorsauren Kalk enthalten; doch speichern auch viele andere Organe Phosphor. Im Gegensatz zum Radium klingen die genannten und auch viele andere künstliche Radioelemente schnell

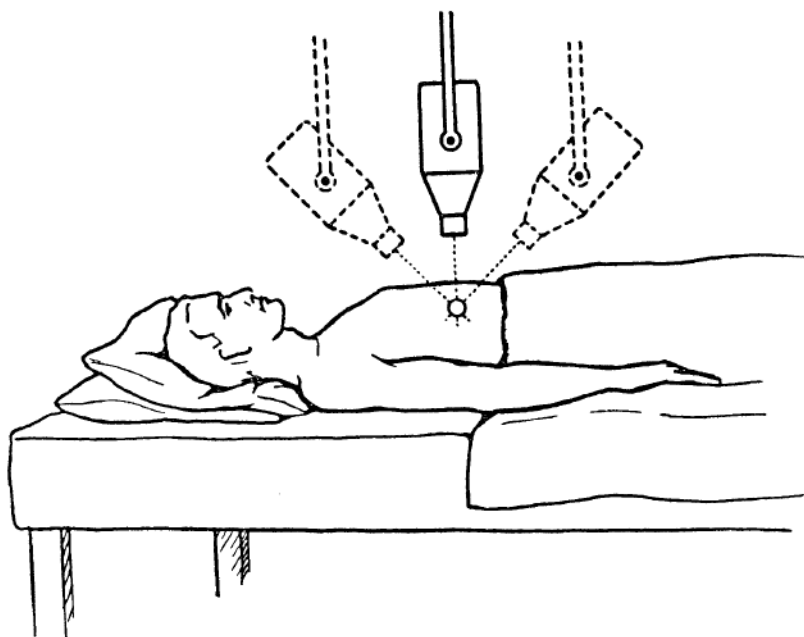


Abb. 29

Bestrahlung mit dem schwenkbaren Kobalt-Pendelgerät

Wenn ein zu bestrahlender Krankheitsherd, etwa eine Krebsgeschwulst, in der Tiefe des Körperinneren sitzt, so wird durch die Gammastrahlung natürlich auch das umliegende gesunde Körpergewebe in Mitleidenschaft gezogen. Um dies möglichst zu verhindern, wird die radioaktive Strahlenquelle (Kobalt 60) in einem schwenkbaren Pendelgerät untergebracht, so daß der Krankheitsherd nacheinander unter verschiedenen Einfallswinkeln und von verschiedenen Seiten her bestrahlt werden kann. Dadurch wird das gesunde Gewebe, das nur während eines Teiles der Bestrahlungsdauer den Strahlen ausgesetzt wird, vor übermäßigem Schaden bewahrt.

ab, so daß eine Dauereinwirkung auf den Körper nicht zu befürchten ist. Doch befinden sich diese Methoden der Krebsbekämpfung noch im Versuchsstadium. Ein abschließendes Urteil über ihren Wert wäre verfrüht.

Bei den beschriebenen therapeutischen Anwendungen der Radioelemente wird also das krankhafte Gewebe durch sehr große Strahlungs Dosen zerstört. Die örtlich verabreichten therapeutischen Strahlungs Dosen — zum Beispiel bei der Vernichtung eines Hautkrebses — können zehnmal größer sein als der tödlichen Dosis

entspricht, die für die Bestrahlung des gesamten menschlichen Körpers berechnet wird. Der Nutzen dieser Bestrahlungen beruht ausschließlich auf dem Umstand, daß *der Tod des kranken Gewebes dem gesunden Gewebe das Fortleben ermöglichen kann.*

Nun interessiert auch die Frage, inwiefern *sehr schwache Dosen* das Allgemeinbefinden eines Körpers *günstig beeinflussen*, also stärkend und belebend wirken können. Der Glaube an eine günstige Wirkung schwacher Dosen radioaktiver Strahlen war früher weit verbreitet. Solche schwache Dosen erhält der Körper in Heilbädern, wo das Wasser geringe Mengen radioaktiver Stoffe (besonders von Emanation) enthält, zum Beispiel in *Gastein* und im *Erzgebirge*.

Die Wissenschaft kann die Frage jedoch noch nicht eindeutig beantworten. Zweifellos nützt der Aufenthalt in einem solchen Heilbad dem Patienten. Aber wie weit die Besserung seines Zustandes anderen Umständen als der Radioaktivität zuzuschreiben ist, zum Beispiel der Wärme der Bäder, der Reinheit und dem geringen Druck der Luft, der Stärke der Sonnenstrahlung, der besseren Ernährung, der Schonung oder gar der täglichen gemütlichen Bridgepartie, bleibt vorläufig unentschieden. So merkwürdig es ist, scheinen nach Kenntnis des Verfassers mit höheren Tieren oder gar mit Menschen bisher keine Versuchsreihen durchgeführt worden zu sein, die die Frage nach der Existenz „biopositiver“ Wirkungen der radioaktiven Strahlung eindeutig zu beantworten gestatten.

Kein Zweifel besteht daran, daß *größere Dosen immer schädlich wirken*. In früherer Zeit ist so mancher Patient an dem Radium gestorben, das ihm ein Arzt zur Stärkung und Verjüngung verordnet hat. Lebensgefährlich war auch das sogenannte *Thorotrast*, ein Thorium enthaltendes Kontrastmittel, das zur besseren Sichtbarmachung von Blutgefäßen im Röntgenbild diente. An der Injektionsstelle der Thorotrastlösung lagerte sich das Thorium samt seinen Zerfallsprodukten ab, sandte Jahrzehnte hindurch seine zerstörende Strahlung aus und erzeugte schließlich in einer Anzahl von Fällen *Krebs*.

Einige Bemerkungen zum Problem Idealismus — Materialismus

Idealistische und materialistische Auffassung

Am Ende unserer Übersicht wollen wir aus den neuen Erkenntnissen noch einige allgemeine Schlüsse ziehen. Die praktischen Erfolge bei der Entwicklung der Atomenergie stellen gleichzeitig einen Erfolg der materialistischen gegen die idealistische Weltauffassung dar.

Die verschiedenen Spielarten der *idealistischen* Weltauffassung tragen das gemeinsame Merkmal, daß sie die Materie, d. h. die reale Außenwelt, in dieser oder jener Form von der Existenz des Geistes abhängig machen.

„Erst das Auge schafft die Welt“, meinte kurz und bündig der dem philosophischen Idealismus anhängende Dichter *Christian Morgenstern*. Damit ist in deutlichster Form ausgedrückt, daß die Welt erst und nur existiere, sobald und solange ein Beobachter sie wahrnimmt. Der Wiener Physiker und idealistische Philosoph *Ernst Mach* wollte nur „Komplexe von Empfindungen“, aber keine Gegenstände der Außenwelt gelten lassen. So soll es im Sinne der Auffassungen *Machs* durchaus unrichtig sein, z. B. von einer Kegelkugel als einem realen Gegenstand zu sprechen. Statt dessen müßte man nach *Mach* den Empfindungskomplex „rund, glatt, hart, braun, schwer“ einführen. Das einzige, was existiert, sollen die eigenen Empfindungen sein.

Nach anderen — teilweise idealistischen — philosophischen Lehren, von denen eine z. B. durch *Kant* Einfluß gewann, wird die vom Menschen unabhängige Existenz einer realen Außenwelt, eines „Dinges an sich“, zwar zugegeben; gleichzeitig wird aber

behauptet, daß die Gesetze, denen die Erscheinungen folgen, diesen gewissermaßen durch den beobachtenden Geist aufgezwungen werden. Raum, Zeit und Kausalität (Gesetzlichkeit) sollen keine vom Menschen unabhängig existierenden Wesenheiten, sondern durch den Menschen in die Welt hineingetragene Anschauungsformen sein.

Der Wesenszug der *materialistischen* Weltauffassung dagegen ist die Überzeugung von der von menschlicher Wahrnehmung unabhängigen Existenz und Gesetzlichkeit einer realen Außenwelt. Diese Existenz und diese Gesetzlichkeit hängen also nicht davon ab, ob ein menschlicher Beobachter vorhanden ist, dessen Sinne die Außenwelt wahrnehmen können, oder nicht. Nach materialistischer Auffassung hat die Außenwelt bestanden, bevor der Mensch entstanden ist. Sie hat bestanden, ehe sich überhaupt Leben auf der Erde geregelt hat. *Boltzmann* schreibt 1905: „Der Idealismus behauptet nur die Existenz des Ich, die Existenz der verschiedenen Vorstellungen, und sucht daraus die Materie zu erklären. Der Materialismus geht von der Existenz der Materie aus und sucht daraus die Empfindungen zu erklären.“ Er bezeichnete den Idealismus als „die größte Narrheit, die je ein Menschenhirn ausgebrütet hat“.

Zu den Gegenständen der realen Außenwelt gehören vor allem die *Atome*. Der philosophische Idealismus hat sich gegen die zum ersten Male von den griechischen Materialisten gemachte Annahme von Atomen gesträubt. So wollte z. B. *Ernst Mach* die Atome höchstens als ein „Bild“ gelten lassen. Nach *Mach*, dessen Auffassungen von *Boltzmann* scharf bekämpft wurden (siehe Seite 18), sollte es nur eine abkürzend-bequeme Sprechweise bedeuten, wenn wir uns des Begriffs des Atoms bedienen; eine reale Existenz käme den Atomen indes nicht zu. (*Stefan Meyer*, der verstorbene Direktor des Wiener Radium-Instituts, erzählt: „Wenn jemand von den Atomisten, die damals in Wien in *Ludwig Boltzmann* ihren Führer hatten, vor *Mach* von Atomen sprach, fuhr dieser meistens mit der Frage dazwischen: „Haben Sie eines gesehen?““)

Wenn die Atome tatsächlich nur ein Hirngespinnst wären (soweit die philosophischen Idealisten doch den Begriff des Hirns akzeptieren), so wäre es unerklärlich, wieso Beobachtungen der verschiedensten Art immer wieder zwanglos und gewissermaßen ganz von selbst auf

die Annahme von Atomen führen. Die Atomlehre hat sich zunächst in der Chemie (auch in der praktischen industriellen Chemie) so hervorragend bewährt, daß sie dort völlig unentbehrlich geworden ist. Die Atomtheorie bildet auch die unentbehrliche Grundlage der Lehre vom Verhalten der Materie in den Aggregatzuständen (fest, flüssig und gasförmig) und der Lehre vom Übergang der Aggregatzustände ineinander. Schließlich haben in unserer Zeit die Beobachtung der Radioaktivität, die Existenz von Reaktoren und leider auch die Explosionen von Atombomben aufs neue klipp und klar erwiesen, daß die Atomlehre mit der Praxis wahrhaftig im Einklang steht.

Schon *Boltzmann* meinte in seiner Abhandlung mit dem bezeichnenden Titel „Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft“ (1897): „Die heutige Atomistik ist ein vollkommen zutreffendes Bild aller mechanischen Erscheinungen, und es ist bei der Abgeschlossenheit dieses Gebietes kaum zu erwarten, daß auf demselben noch Erscheinungen entdeckt werden könnten, welche sich nicht in den Rahmen des Bildes fügen . . . Die Atomistik ist dabei noch großer Weiterentwicklung fähig . . .“

Natürlich kann man nach materialistischer Auffassung nicht von vornherein (a priori) wissen, welche Eigenschaften die Atome besitzen werden. Das wird den Materialisten von idealistischer Seite gelegentlich zum Vorwurf gemacht. Die Materialisten werden beschuldigt, daß sie die Naturerkenntnis „vergrößern“, indem sie sich die letzten Einheiten körperhaft (etwa als winzige Kegelkugeln) vorstellen. Der Vorwurf ist gänzlich unbegründet. Im Gegenteil: gerade die Materialisten sind es, die vorgefaßte Meinungen über die Natur und die Gesetze der Außenwelt ablehnen. Gerade die Materialisten sind sich bewußt, daß der beobachtende Mensch seine Begriffe nach den Gesetzen der von ihm unabhängig existierenden Außenwelt bilden muß. Deshalb haben die Materialisten auch keine vorgefaßten Meinungen darüber, ob die materiellen Teilchen unter Umständen Züge von Schwingungsvorgängen aufweisen oder nicht. Die neuere Physik zeigt experimentell in überzeugender Weise, daß eine solche Annahme tatsächlich zutrifft. Es gibt auch Schwingungen, die überhaupt nicht an Teilchen gebunden sind, sondern im leeren Raum erfolgen; so pflanzt sich das Licht durch den Weltraum fort. Das vom

Standpunkt des Materialisten Entscheidende ist, daß auch diese Schwingungsvorgänge unabhängig vom Bewußtsein existieren und nicht willkürliche Annahmen des menschlichen Geistes sind.

Kein Naturforscher, Chemiker oder Techniker kann heute auch nur einen Tag lang arbeiten, ohne in der Praxis Materialist zu sein und die Existenz der Atome zu akzeptieren. Das heißt freilich nicht, daß alle Forscher sich zum Materialismus bekennen. Im Gegenteil: häufig muß man tiefe Inkonsequenz feststellen. Zwar waren und sind zahlreiche Forscher, wie z. B. *Boltzmann*, *Langevin*, *Joliot* und *Bernal*, bewußte Materialisten. Auch *Thirring* bekennt sich in seinem Buch „Anti-Nietzsche, Anti-Spengler“ zum dialektischen Materialismus im Einklang mit einer von *Stalin* gegebenen Definition.

Aber dennoch findet man sehr oft, daß Forscher oder Techniker, die in ihrer täglichen Arbeit praktische Materialisten sind, außerhalb dieser Berufsarbeit Anhänger idealistischer oder religiöser Auffassungen sind. Wir kennen Biologen und Tierzüchter, die sehr genau wissen, wie und wann ein Ei befruchtet wird — und die doch an die „Unbefleckte Empfängnis“ glauben. So darf es uns auch nicht allzusehr wundern, daß es Physiker, Chemiker, Ingenieure gibt, die zwar den Radius der Atome auf ein Prozent genau berechnen können — und die doch die Existenz der Außenwelt in Zweifel ziehen. Diese eigentümliche Inkonsequenz ist eine *soziale Erscheinung*, die hier nicht weiter diskutiert werden kann. Tatsache ist aber, daß reale praktische Erfolge auf *jenen* Gebieten erzielt werden, wo *materialistisch* gearbeitet wird. In diesem Sinne stellt die Entwicklung der Atomenergie eine neue glänzende Bestätigung der materialistischen Weltauffassung dar.

Die Atome und der Entwicklungsgedanke

Der Materialismus unserer Zeit ist nicht mehr — wie z. B. der französische Materialismus des 18. Jahrhunderts — ein *mechanischer Materialismus*. Der Materialismus unserer Zeit ist vielmehr der *dialektische* Materialismus, der von *Karl Marx* und *Friedrich Engels*

begründet wurde. Das Neue am dialektischen Materialismus liegt darin, daß er die Materie nicht mehr als ein für allemal unabänderlich geformt betrachtet. Der dialektische Materialismus legt im Gegenteil Wert darauf, die *Materie in ihrer geschichtlichen Entwicklung* zu betrachten, wobei ihre Teile in Wechselwirkung stehen.

Gerade die moderne Atomlehre zeigt nun, daß die Erscheinungsformen der Materie keineswegs zu allen Zeiten und unter allen Umständen die gleichen sind. Vielmehr steht die Materie im Zentrum eines gewaltigen, widerspruchsvollen Entwicklungsvorganges und weist je nach dem Stadium, in dem sie sich befindet, die verschiedensten Eigenschaften auf.

Nehmen wir z. B. die Atome. Bei der Temperatur des Sonneninneren sind ihre Geschwindigkeiten sehr groß und reichen aus, die Hüllenelektronen zumindest von den leichteren Atomkernen (Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff usw.) völlig abzuscheren. Diese Atomkerne sind also nackt. Gäbe es etwa einen Geist, der seine Kenntnisse nur aus der Betrachtung des Inneren der Sonne schöpfen müßte, so hätte er keinerlei Erfahrung eines Wasserstoffatoms, da dieses unter den betrachteten Verhältnissen gar nicht existenzfähig ist. Unter den Bedingungen des Sonneninneren kommen also Atom-eigenschaften nicht zur Geltung, die auf der Existenz der Elektronenhüllen beruhen, z. B. chemische Verbindungsfähigkeit, Farbe usw. Übrigens ist es möglich, daß unter gewissen Bedingungen (nämlich bei noch viel höheren Temperaturen) nicht einmal die Atomkerne selbst existenzfähig sind, so daß die Materie dann hauptsächlich aus isolierten Nukleonen besteht!

Nehmen wir nun an, daß die Atome sich abkühlen und zuerst die Temperatur der Sonnenoberfläche und dann die Temperatur der Erdoberfläche aufweisen. Die Atome erhalten nun ihre volle Elektronenhülle, werden chemisch verbindungsfähig und bilden Moleküle. Diese Moleküle können sich zu komplizierteren Gebilden, wie Kristallen und Flüssigkeiten, zusammenschließen.

Wieder finden wir, daß sich mit fortschreitender Entwicklung der Materie nicht nur Eigenschaften, die früher schon vorhanden waren, besser ausprägen. Die Ausbildung der Elektronenhüllen und der Moleküle bringt vielmehr *neue* Eigenschaften zum Vorschein, die der

Beobachter in früheren Entwicklungsstadien offenbar überhaupt nicht kennen konnte. Die Materialisten drücken diesen Sachverhalt gerne dadurch aus, daß sie von einem *Umschlagen der Quantität in Qualität* sprechen (Übergang vom nackten Atomkern über das komplette Atom und das Molekül zur „Kondensation“ als Kristall oder als Flüssigkeit).

Unter den Molekülen, die sich an der Oberfläche der Ur-Erde gebildet haben, müssen sich auch organische Moleküle, also Verbindungen von Kohlenstoff mit Wasserstoff und anderen Elementen befunden haben. Der sowjetische Biochemiker *Oparin* hat konkrete Vorstellungen entwickelt, auf welche Weise die weitere Entwicklung zur *Entstehung des Lebens* auf der Erde führen konnte. Die lebende Substanz weist wieder neue Merkmale auf, die an niedrigeren Entwicklungsstufen der Materie nicht beobachtet werden können. Bei den höher entwickelten Lebewesen spielt die Tätigkeit des Nervensystems eine besondere Rolle, und schließlich ergeben sich beim Menschen die psychischen Vorgänge. Die Diskussion dieser Fragen überschreitet selbstverständlich den Rahmen dieses Buches.

Hegel, der zwar eine idealistische Philosophie vertrat, der aber nichtsdestoweniger von *Marx* und *Engels* in mancher Hinsicht hochgeschätzt wurde, führte die Entwicklung auf den Kampf *gegensätzlicher Tendenzen* zurück. Bei der Betrachtung der Geschichte der Atome erkennen wir die Gegenteilstendenzen offenbar einerseits in den Kräften, die von den Elementarteilchen ausgehen und ein Zusammenstreben, eine Kombination, die Entstehung komplexer Einheiten bewirken, und andererseits in dem zerstörenden Einfluß der ungeordneten Temperaturbewegung. Auch in der belebten Natur liegen die Aufbau- und die Zersetzungs Vorgänge im Widerstreit.

Die Naturforschung lehrt uns also, daß in der unbelebten wie in der belebten Welt ständige Entwicklungsvorgänge ablaufen. „Alles fließt“ in der Natur, um die Worte des genialen altgriechischen Philosophen *Heraklit* zu gebrauchen. Zu den bedeutendsten Werken des großen *Boltzmann* gehören jene, in denen er seine Überzeugung ausspricht und wissenschaftlich begründet, daß Entwicklungsvorgänge im Weltall ewig stattgefunden haben und ewig fort dauern werden.

Namenverzeichnis

- Amaldi, Edoardo** (geb. 1908). Führender Kernphysiker Italiens, fand mit *Fermi, Pontecorvo* und anderen die Verlangsamung des Neutrons. Professor in Rom.
- Aristoteles** (384—322 v. u. Z.). Griechischer idealistischer Philosoph und Naturforscher, Schüler *Platos*, Erzieher *Alexanders* von Mazedonien. Verfasser von 400 Büchern. Galt im Mittelalter als große Autorität. Beeinflusste den *Thomas von Aquino*. Gegner der Atomistik.
- Becquerel, Henri** (1852—1908). Entdeckte bei Versuchen mit Uran die Radioaktivität durch ihre photographische Wirkung.
- Bernal, John D.** (geb. 1901). Experimentalphysiker irischer Abkunft, Professor in London, hervorragender Kristallograph, hat den Aufbau vieler Stoffe aus den Atomen geklärt. Nimmt an den Fragen der Entstehung des Lebens sowie auch an den Problemen der praktischen Anwendung der Wissenschaft großes Interesse. Verfasser von Büchern über soziale Bedingungen und Auswirkungen der Wissenschaft. Mitglied des Weltfriedensrates.
- Bethe, Hans** (geb. 1906). Deutscher theoretischer Physiker, emigrierte 1933 nach Amerika, arbeitete über die Struktur der Atomkerne und die Radioaktivität. Schlug den „*Bethe-Zyklus*“ als Wärmequelle der Sonne vor.
- Blackett, Patrick M. S.** (geb. 1897). Schüler *Rutherford's*, Professor in London, photographierte Kernumwandlungen in der Nebelkammer, Schöpfer wichtiger experimenteller Verfahren zur Erforschung der Atomkerne und der kosmischen Strahlung, Verfasser eines wertvollen Buches über die Strategie der Atombombe.
- Blochinzew, Dmitri Iwanowitsch** (geb. 1908). Sowjetischer theoretischer Physiker, ist am Bau des ersten Atomkraftwerkes der Welt und anderer Reaktoren schwieriger Konstruktion führend beteiligt.
- Bohr, Niels** (geb. 1885). Dänischer theoretischer Physiker, 1911—1913 Mitbegründer des Planetenmodells des Atoms, erforschte die Absorption der Strahlen. Später (1935) Begründer des Tröpfchenmodells des Atomkerns, lieferte auch wesentliche Beiträge zur Theorie der Kernspaltung des Urans.
- Boltzmann, Ludwig** (1844—1906). Österreichischer theoretischer Physiker, energischer Vorkämpfer der Atomistik und materialistischer Philosoph. Berechnete die Bewegungsgesetze der Atome in Gasen und erklärte die Wärmelehre auf atomistischer Grundlage.

- Bothe, Walter** (geb. 1891). Deutscher Experimentalphysiker, beobachtete die Erscheinungen, die dann zur Entdeckung des Neutrons durch *Chadwick* (1932) führten, verbesserte die Meßtechnik für radioaktive und kosmische Strahlen.
- Boskowitzsch, Roger** (1711—1787). Kroat aus Dubrovnik, Geistlicher, lehrte an italienischen Universitäten Mathematik und Astronomie, Vorkämpfer der Atomlehre.
- Boyle, Robert** (1627—1691). Britischer Chemiker, Atomist, Schöpfer des modernen Elementbegriffs, erforschte die Zusammensetzung der Luft, Präsident der Königlichen Gesellschaft (der Wissenschaften).
- Brown, Robert** (1773—1858). Botaniker, Professor in London, Entdecker der *Brownschen* Bewegung.
- Bruno, Giordano** (1548—1600). Italienischer Philosoph, ursprünglich Mönch, lehrte die Zusammensetzung der Welt aus Atomen und die Unendlichkeit des Weltalls, wurde deshalb nach siebenjähriger Haft durch die päpstlichen Behörden lebendig verbrannt.
- Chadwick, James** (geb. 1891). Schüler *Rutherford's*, arbeitete zuerst in Cambridge, dann als Professor in Liverpool, entdeckte das Neutron.
- Clausius, Rudolf** (1822—1888). Physiker, Professor in Würzburg und Bonn, legte den Grund für die zahlenmäßige Behandlung von Gastheorie und Wärmelehre auf atomistischer Grundlage.
- Cockcroft, John D.** (geb. 1897). Ursprünglich Elektroingenieur, Schüler *Rutherford's*, baute mit *Walton* die erste Maschine zur Transmutation, derzeit wissenschaftlicher Leiter der britischen Atomenergieforschung.
- Curie, Irène** (geb. 1897). Tochter von *Pierre Curie* und *Marie Skłodowska-Curie*, Experimentalphysikerin, entdeckte mit ihrem Gatten *Frédéric Joliot* die künstliche Radioaktivität, förderte auch durch viele andere wichtige Arbeiten die Kernphysik.
- Curie-Skłodowska, Marie** (1867—1935). Ging als Studentin aus dem vom Zarismus unterdrückten Polen nach Paris, wo sie *Pierre Curie* heiratete. Begründete in Gemeinschaft mit ihrem Gatten die Wissenschaft von der Radioaktivität. Bemühte sich nach Kräften, sie in den Dienst des Menschheitsfortschritts zu stellen, insbesondere auch der Medizin dienstbar zu machen. Mutter *Irène Curies*.
- Curie, Pierre** (1859—1906). Französischer Physiker, erforschte mit seiner Gattin *Marie Skłodowska-Curie* die Radioaktivität und entdeckte mit ihr Polonium und Radium. Leistete auch grundlegende Arbeiten über Magnetismus.
- Dalton, John** (1766—1844). Schullehrer in Manchester. Führte die Atomlehre in die Chemie ein, um die Verbindungsfähigkeit der Elemente zu erklären.
- Darwin, Charles** (1809—1882). Englischer Zoologe, brachte die Lehre von der Entwicklung der lebenden Materie und von der Entstehung höherer Tiere und Pflanzen aus weniger hoch organisierten Lebensformen gegen große Widerstände (insbesondere der Kirchen) zum Durchbruch, bewies die Abstammung des Menschen von affenartigen Vorfahren.

- Demokrit** (ca. 460—370 v. u. Z.). Griechischer Philosoph, Materialist, begründete mit seinem älteren Freund und Lehrer *Leukipp* die Lehre von den Atomen.
- Einstein, Albert** (1879—1955). Bedeutendster theoretischer Physiker unserer Zeit, geboren in Ulm, studierte und arbeitete zuerst in der Schweiz, später in Berlin, emigrierte 1933 nach Amerika. Begründete die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, erzielte wesentliche Fortschritte auch in der Quantentheorie, deutete auf Grund der Theorien *Boltzmanns* die *Brownsche* Bewegung, nahm gegen die Aufgabe der Kausalität durch zeitgenössische Physiker Stellung, Kämpfer für Frieden und Fortschritt.
- Engels, Friedrich** (1820—1895). Befaßte sich zusammen mit *Karl Marx* im Sinne des dialektischen Materialismus intensiv mit philosophischen Fragen („Ludwig Feuerbach“ und „Anti-Dühring“) sowie mit Fragen der Naturwissenschaft („Dialektik der Natur“).
- Faraday, Michael** (1791—1867). Experimentalphysiker, Autodidakt. Erforschte die Wechselwirkung von Elektrizität und Magnetismus und viele andere physikalische Fragen, erkannte die atomistische Struktur der Elektrizität an den Erscheinungen der Elektrolyse.
- Fermi, Enrico** (1901—1954). Theoretischer Physiker, lieferte Beiträge von enormer Bedeutung zur Theorie der Atome, der Atomkerne und der kosmischen Strahlung, entdeckte mit seinen Kollegen 1934 die Verlangsamung des Neutrons, emigrierte 1938 aus Italien, baute 1942 in Chicago den ersten Uranreaktor.
- Galilei, Galileo** (1564—1642). Italienischer Mathematiker und Physiker, Mit-erfinder des Fernrohrs, förderte in hohem Maße die Astronomie, Kritiker des *Aristoteles* und der Bibel, Anhänger des *Kopernikus*. Wurde durch die Inquisition unter Androhung der Folter zum Widerruf seiner Lehren gezwungen und verbannt.
- Geiger, Hans** (1882—1945). Experimentalphysiker, Schüler *Rutherfords*, war Professor in Berlin, erfand das *Geiger-Zählrohr*, das das wichtigste Gerät zur Messung der Radioaktivität wurde.
- Goldschmidt, Viktor Moritz** (1888—1947). Geochemiker, Professor in Göttingen, wurde später von den Okkupanten in Oslo verhaftet und ins Konzentrationslager geworfen, wo seine Gesundheit gebrochen wurde. Untersuchte die Verteilung der radioaktiven Elemente über die Erde und wies nach, daß in der Erdkruste keine Transurane vorkommen.
- Goudsmit, Samuel** (geb. 1902). Holländischer theoretischer Physiker, wanderte nach Amerika aus, wo er 1926 den Drall (Spin) des Elektrons entdeckte, bei der Offensive der Westmächte gegen Nazideutschland 1944 mit der Untersuchung deutscher Atombombengeheimnisse betraut.
- Hahn, Otto** (geb. 1879). Deutscher Radiochemiker, entdeckte mehrere radioaktive Kernarten, arbeitete — vielfach in Gemeinschaft mit *Lise Meitner* — über Theorie und Praxis der Radiochemie, begründete das Emanierverfahren, entdeckte mit *Straßmann* die Kernspaltung des Urans, derzeit Präsident der *Max-Planck-Gesellschaft*.

- Haissinsky, Moise** (geb. 1905). Führender Radiochemiker Frankreichs, arbeitet am Pariser Radiuminstitut über das Element Polonium, über Elektrochemie der radioaktiven Stoffe, über das Verhalten radioaktiver Lösungen und über die chemischen Wirkungen der Strahlung.
- Hegel, Georg F. W.** (1770—1831). Professor in Berlin, betrachtete die Entwicklung des Weltgeschehens dialektisch als Kampf gegensätzlicher Tendenzen. Hegels dialektische Methode wurde von *Marx* und *Engels*, den Begründern des dialektischen Materialismus, hochgeschätzt, obwohl *Hegels* Philosophie durchaus idealistisch ist und *Hegel* konservativ eingestellt war.
- Heraklit** (ca. 540—475 v. u. Z.). Griechischer Philosoph, gilt als Begründer der Dialektik, also der Methode, Materie und Geist nicht als unveränderlich, sondern infolge des Kampfes gegensätzlicher Tendenzen als in ununterbrochener Entwicklung begriffen zu betrachten.
- Hevesy, Georg** (geb. 1885). Ungarischer Chemiker, Schüler *Rutherford*s, begründete mit *Paneth* am Wiener Radiuminstitut die Methode der markierten Atome, führte später diese Methode in die Biologie ein, entdeckte das Element Hafnium, arbeitet gegenwärtig in Stockholm über Radio-biochemie.
- Joliot, Frédéric** (geb. 1900). Der führende Experimentalphysiker Frankreichs, trug zu den Forschungen bei, die zur Entdeckung des Neutrons führten, entdeckte mit seiner Frau *Irène Curie* die künstliche Radioaktivität sowie mit *Halban* und *Kowarski* die Emission von Neutronen bei der Spaltung des Urans, wodurch sich die Möglichkeit einer Kettenreaktion ergab. Führer der nationalen Widerstandsbewegung während des Krieges, wurde er nach der Befreiung Leiter der französischen Atomenergiebehörde und baute den ersten Uranreaktor Westeuropas. Wurde wegen seiner Tätigkeit als Präsident der Weltfriedensbewegung von der Regierung abgesetzt, arbeitet als Professor an der Sorbonne.
- Kant, Immanuel** (1724—1804). Philosoph und Naturforscher, Professor in Königsberg, förderte bedeutend unsere Kenntnis der Himmelsmechanik, lieferte trotz seiner teilweise idealistischen Einstellung wichtige Beiträge zur Erkenntnislehre und zu anderen Zweigen der Philosophie.
- Kapitza, Peter** (geb. 1894). Sowjetischer Experimentalphysiker, arbeitete eine Zeitlang bei *Rutherford*, erforscht den Magnetismus und tiefe Temperaturen, bei denen er neue Zustände der Materie entdeckte, hervorragender Konstrukteur von Geräten.
- Langevin, Paul** (1872—1946). Französischer theoretischer Physiker, arbeitete auf dem Gebiete der Radioaktivität, des Magnetismus und des Schalls, Materialist, Kämpfer für sozialen Fortschritt, von den deutschen Okkupanten eingekerkert.
- Lenin, Wladimir Iljitsch** (1870—1924). Nahm auf philosophischem Gebiet gegen den Idealismus und Positivismus (vertreten besonders durch *Ernst Mach*) energisch Stellung und entwickelte den dialektischen Materialismus von *Marx* und *Engels*. *Lenins* Werk „Materialismus und Empiriokritizismus“

- (1909) enthält eine Auseinandersetzung mit den philosophischen Folgerungen, die aus der neueren Naturwissenschaft zu ziehen sind.
- Libby, Willard F.** (geb. 1908). Amerikanischer Radiochemiker, begründete die Radiokohlenstoffmethode der Altersbestimmung.
- Lomonossow, Michail Wassiljewitsch** (1711—1765). Dichter, Forscher und vielseitiger Organisator, Gründer der Russischen Akademie der Wissenschaften, faßte die Wärme als Bewegung der Atome auf, begründete Gesetze von der „Erhaltung der Substanz und der Bewegung“.
- Loschmidt, Josef** (1821—1895). Experimentalphysiker, wurde nach schwerer Jugend in Armut Professor in Wien, berechnete als erster die ungefähre Größe der Atome.
- Mach, Ernst** (1838—1916). Wiener Physiker, Wissenschaftshistoriker und Philosoph, Gegner der Atomistik, Vertreter der idealistischen philosophischen Richtung des Positivismus, führte durch lange Zeit Debatten mit seinem materialistischen Kollegen *Ludwig Boltzmann*.
- Marx, Karl** (1818—1883). Befaßte sich gemeinsam mit seinem Freund *Friedrich Engels* auf theoretischem Gebiete mit Fragen der Philosophie, der Geschichte und der Nationalökonomie, verband die dialektische Methode mit dem Materialismus zur Philosophie des dialektischen Materialismus.
- Maxwell, James Clerk** (1831—1879). Schottischer theoretischer Physiker, Begründer des ersten physikalischen Hochschullaboratoriums in Großbritannien (Cambridge), stellte auf Grund der Anschauungen *Faradays* die elektromagnetische Lichttheorie auf und erforschte die Bewegungsgesetze der Atome in Gasen.
- Meitner, Lise** (geb. 1878). Kernphysikerin österreichischer Abkunft, Schülerin *Boltzmanns*, arbeitete zumeist in Berlin, und zwar oft in Gemeinschaft mit *Hahn*, erforschte den Betazerfall, emigrierte 1938 nach Schweden, erklärte (mit ihrem Neffen *Otto Frisch*, damals in Kopenhagen) den Mechanismus der Kernspaltung.
- Mendelejew, Dimitri Iwanowitsch** (1834—1907). Professor in Petersburg, ordnete als erster die chemischen Elemente in ihrer Gesamtheit in einem Periodischen System an, wirkte auch auf anderen Gebieten, zum Beispiel dem der Petroleumchemie, bahnbrechend.
- Meyer, Lothar** (1830—1895). Physikalischer Chemiker, Professor in Karlsruhe und Tübingen, erwarb sich gleichfalls große Verdienste um die periodische Anordnung der Elemente.
- Newton, Isaac** (1643—1727). Englischer Physiker, lehrte in Cambridge, Begründer der Mechanik, Entdecker der Schwerkraft, leistete großartige Beiträge zu vielen Zweigen der Physik, Anhänger der Atomlehre, gleichzeitig mit *Leibniz* Erfinder der Integralrechnung.
- Oparin, Alexander Iwanowitsch** (geb. 1894). Biochemiker, Professor in Moskau und Vizepräsident der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, befaßt sich mit den Fragen der Entstehung des Lebens auf der Erde.

- Oppenheimer, J. Robert** (geb. 1904). Theoretischer Physiker, jahrelang Leiter der amerikanischen Atombombenforschung, wurde 1954 wegen ehemaliger fortschrittlicher Tendenzen (Gegnerschaft gegen *Franco* usw.) sowie wegen seiner Bedenken gegen die Wasserstoffbombe abgesetzt.
- Paneth, Fritz** (geb. 1888). Begründete am Wiener Radiuminstitut gemeinsam mit *Hevesy* die Methode der markierten Atome, arbeitet erfolgreich auf vielen Gebieten der Radiochemie und über radioaktive Altersbestimmung, emigrierte 1933 aus Deutschland, gegenwärtig Professor in Mainz.
- Pauli, Wolfgang, junior** (geb. 1900). Theoretischer Physiker, geboren in Wien, lebt in der Schweiz, erklärte den Schalenaufbau der Atomhülle und das Verhalten der Elektronen in Metallen, förderte auch die Kernphysik durch eine Theorie des Betazerfalls.
- Planck, Max** (1858—1946). Professor in Berlin, 1900 Begründer der Quantentheorie, die für die Erklärung der Eigenschaften der Lichtstrahlung und der Atome entscheidend wurde; auch auf dem Gebiete der Wärmelehre sind ihm besondere Fortschritte zu verdanken.
- Pontecorvo, Bruno** (geb. 1913). Italienischer Kernphysiker, Schüler *Fermis* und *Joliot's*, emigrierte 1939 aus Italien, nahm an der kanadischen und britischen Atomenergieforschung in führender Stellung teil, übersiedelte 1950 nach Moskau, arbeitet dort am größten Synchrotron der Welt über die Struktur der Atomkerne.
- Röntgen, Wilhelm Konrad** (1846—1923). Professor in Würzburg und München, entdeckte beim Studium elektrischer Entladungen die nach ihm benannten Strahlen, in manchen Ländern auch als X-Strahlen bekannt.
- Rutherford, Ernest** (1871—1937). Aus Neuseeland gebürtig, Professor der Experimentalphysik in Manchester und Cambridge, trug in entscheidender Weise zur Kenntnis der Radioaktivität bei, unterschied als erster zwischen Atomkern und Atomhülle, wodurch er zum Mitbegründer des Planetenmodells des Atoms wurde, erzielte die erste künstliche Transmutation, sagte die Existenz des Neutrons vorher.
- Saha, M. N.** Indischer Physiker und Astrophysiker, nimmt an der technischen Entwicklung Indiens tätiges Interesse.
- Schmidt, Otto Juljewitsch** (geb. 1891). Professor in Moskau, Mathematiker, Kosmologe und Polarforscher, Autor einer wichtigen, vieldiskutierten Theorie der Entstehung der Planeten aus kaltem kosmischem Staub.
- Schweidler, Egon** (1875—1948). Physiker, Professor in Wien, erkannte als erster, daß die Strahlung radioaktiver Stoffe Schwankungen unterliegen muß, weil die Atome unabhängig voneinander zerfallen.
- Seaborg, Glenn Theodore** (geb. 1912). Amerikanischer Kernphysiker und Radiochemiker schwedischer Abkunft, Entdecker mehrerer Transurane und Begründer wichtiger Verfahren zur Untersuchung radioaktiver Stoffe.
- Skobelzyn, Dmitri Wladimirowitsch** (geb. 1892). Sowjetischer Experimentalphysiker, führte die Nebelkammer in die Erforschung der kosmischen

- Strahlen ein, arbeitete erfolgreich über diese Strahlen, nimmt an der Atomenergieforschung der UdSSR führend Anteil.
- Smoluchowski, Marian** (1872—1917). Polnischer theoretischer Physiker, Professor in Lwow (Lemberg), erklärte unabhängig von *Einstein* auf Grund der Anschauungen *Boltzmanns* die *Brownsche* Bewegung.
- Soddy, Frederick** (geb. 1877). Stammt aus Schottland, Mitbegründer der Radiochemie, viele Jahre enger Kollege *Rutherford's*, dann Professor in Oxford, begründete die Lehre von der Isotopie, faßte den Gedanken der Nutzbarmachung der Atomenergie.
- Stalin, Josef Wissarionowitsch** (1879—1953). War auch auf dem Gebiet der Philosophie tätig und entwickelte die von *Marx*, *Engels* und *Lenin* begründete dialektisch-materialistische Richtung weiter. Siehe z. B. die Schriften „Über dialektischen und historischen Materialismus“ und „Probleme des Leninismus“.
- Stefan, Josef** (1835—1893). Entstammte slowenischer Kleinbauernfamilie, wirkte als Experimentalphysiker atomistischer Richtung in Wien, arbeitete über Gastheorie und Lichtstrahlung, wurde von seinem Schüler *Boltzmann* sehr verehrt.
- Thirring, Hans** (geb. 1888). Schüler von *Boltzmanns* Schüler *Fritz Hasenöhl*, Professor der theoretischen Physik in Wien, Verfasser zahlreicher Schriften über wissenschaftliche, psychologische und philosophische Fragen.
- Thomson, J. J.** (1857—1940). Professor in Cambridge, arbeitete über elektrische Entladungen in Gasen, fand dabei das Elektron und bestimmte seine elektrische Ladung, also die elektrische Elementarladung.
- Wells, Herbert George** (1866—1946). Engländer, studierte ursprünglich Naturwissenschaft, arbeitete dann als populärwissenschaftlicher und sozialkritischer Schriftsteller, Verfasser zahlreicher Romane, darunter auch eines Romans über die Verwendung der Atomenergie (1913), besuchte 1920 *Lenin* im Kreml.
- Wernadsky, Wladimir Iwanowitsch** (1863—1945). Begründer der russischen und später sowjetischen Geochemie, erforschte die chemische Zusammensetzung der Erdkruste und die Verteilung der chemischen Elemente, darunter auch der radioaktiven Elemente.
- Wilson, C. T. R.** (geb. 1867). Schottischer Physiker, ursprünglich meteorologisch interessiert, faßte auf Grund seiner Forschungen über Nebel den Gedanken der Nebelkammer, die er zur Veranschaulichung und Untersuchung der radioaktiven Strahlung verwendete, Mitarbeiter *Rutherford's*.

Zeittafel

- 420 v. u. Z. Begründung der Atomlehre durch *Leukipp* und *Demokrit*.
16. bis 18. Jahrhdt. Entwicklung der Atomlehre durch *Giordano Bruno*, *Galilei*, *Newton*, *Boskowitzsch*, *Lomonossow*.
1600. Verbrennung *Brunos* durch die päpstliche Inquisition.
1624. In Frankreich: Androhung der Todesstrafe für die Verbreitung der Atomlehre.
1808. Anwendung der Atomlehre auf die Chemie durch *Dalton*.
1869. Aufstellung des Periodischen Systems der Elemente durch *Mendelejew*.
- 1850—1890. Atomistische Begründung der Wärmelehre durch *Clausius*, *Maxwell*, *Boltzmann*.
1865. Bestimmung der Größe der Atome durch *Loschmidt*.
1895. Entdeckung der Röntgenstrahlen.
1896. Entdeckung der Radioaktivität durch *Becquerel*.
1898. Entdeckung des Elektrons durch *J. J. Thomson*.
1898. Entdeckung des Radiums durch das Ehepaar *Pierre* und *Marie Curie*.
1900. Begründung der Quantentheorie durch *Planck*.
1905. Entdeckung der Isotopie durch *Rutherford* und *Soddy*.
1905. Aufstellung der Beziehung zwischen Masse und Energie durch *Einstein*.
- 1905, 1906. Aufklärung der *Brownschen* Bewegung durch *Einstein* und *Smoluchowski*.
- 1911—1913. Aufstellung des Planetenmodells des Atoms durch *Rutherford* und *Bohr*.
1913. Erfindung des Zählrohrs durch *Geiger*.
1913. Erfindung der Methode der „markierten Atome“ durch *Hevesy* und *Paneth*.
1919. Künstliche Atomumwandlung (Transmutation) durch *Rutherford*.
1923. Einführung der Methode der „markierten Atome“ in die Biologie durch *Hevesy*.
1932. Atomumwandlung mit Maschinen durch *Cockcroft* und *Walton*.
1932. Entdeckung des Neutrons durch *Chadwick* auf Grund der Beobachtungen *Bothes* und *Joliot's*.
1932. Entdeckung des Positrons durch *Anderson*.
1934. Verlangsamung des Neutrons durch *Fermi* und Kollegen.
1934. Entdeckung der künstlichen Radioaktivität durch *Joliot* und *Irène Curie*.

- 1935. Aufstellung des „Tröpfchenmodells“ des Atomkerns durch *Bohr*.
- 1939. Entdeckung der Urankernspaltung durch *Hahn* und *Straßmann*.
- 1939. Aufklärung des Mechanismus der Spaltung und Nachweis der Energieentbindung durch *Meitner* und *Frisch*.
- 1939. Nachweis der Neutronenemission durch *Joliot, Halban* und *Kowarski*. Gedanke der Kettenreaktion.
- 1940. Nachweis der spontanen Kernspaltung des Urans durch *Flerow* und *Petvžah*.
- 1940–1955. Transurane bis Element 101 erzeugt (größtenteils durch *Seaborg*).
- 1942. Fertigstellung des ersten Reaktors durch *Fermi* in Chicago.
- 1945. Zerstörung von Hiroshima und Nagasaki.
- 1945. Synchrotron erfunden durch *Wehler*.
- 1946. *Baruch*-Plan für Atomtrust eingebracht.
- 1946. Sowjetvorschlag auf Verbot des Atomkrieges und Zerstörung der Atomwaffen eingebracht.
- 1949. Erste Versuche mit Atombomben in der UdSSR.
- 1950. *Trumans* Direktive zum Bau von Wasserstoffbomben.
- 1950. Stockholmer Appell der Weltfriedensbewegung gegen Atomkrieg erlassen.
- 1952. Im Zuge der Herstellung der Wasserstoffbombe thermonukleare Explosion im Eniwetok-Atoll.
- 1953. Erste Versuche mit Wasserstoffbomben in der UdSSR.
- 1954. Auf Radioaktivität gezüchtete Bombe im Bikini-Atoll zur Explosion gebracht. Japanische Fischer zum Teil tödlich verletzt.
- 1954. *Oppenheimer*, Leiter der amerikanischen Atombombenforschung, wegen Bedenkens gegen Wasserstoffbombe entlassen.
- 1954. Erstes Atomkraftwerk der Welt in der UdSSR in Betrieb genommen.
- 1954. Atom-U-Boot „*Nautilus*“ fertiggestellt.
- 1955. Wiener Appell der Weltfriedensbewegung gegen Atomkrieg erlassen.
- 1955. Genfer Konferenz für friedliche Anwendung der Atomenergie.

Sachregister

(Anmerkung: Ausdrücke, die an sehr vielen Stellen vorkommen, wie z. B. *Radioaktivität* oder *Energie*, sind nicht in das Verzeichnis aufgenommen.)

- Aktinuran 105
Aktivierungsanalyse 201
Alchimie 41, 80
Algen 187
Alkalimetalle 38, 40, 45, 139
Alphazerfall (Grundsätzliches) 57, 101
Aluminium 41, 125, 140
Americium 129
Amortisation 138, 149, 150
Anämie 165, 196
Argonmethode (Altersbestimmung) 68, 70
Arsenvergiftung 221
Atombank 177
Atomgewicht 40-42, 53, 54, 70, 71
Atomhülle (Grundsätzliches) 31, 32
Atomkern (Grundsätzliches) 31, 32
Atomkraftwerk, siehe Kraftwerk
Atomnummer 32
Atomtrust 177
Austauscher 138, 139
Autoradiographie 62, 206
- Bakterien 218
Barium (Kontrastmittel) 197
Baumwolle 28
Baumwollkäfer 219
Bergbau 90, 200
Berkelium 129
Beschleuniger 76
Beschuß mit Ionen bzw. Neutronen 75-79, 94, 100, 105
Betatron 76
Betazerfall (Grundsätzliches) 58
Bevatron 77
- Bindung 34, 42, 100-105, 166
Biologie 17, 164, 183-198, 231
Blech 204, 210
Bleimethode (Altersbestimmung) 67, 68
Bleipanzer, siehe Panzer
Blut 12, 165, 166, 185, 186, 194
Bor 121, 122
Borkenkäfer 219
Bremsung (Neutronen) 113-118, 132, 155
Brownsche Bewegung 26
Brüten 132, 133, 147
- Californium 130
Carnotit 142, 143
Cäsium 213
Chlorophyll 186, 189
Curie (Einheit) 60, 90
Curium 129
- Dampf 21, 63, 73, 84, 128, 137, 138, 172, 220
Dampfturbine 135, 137-140, 148
Desinfektion 218, 219
Destillation 73
Deuterium, siehe Wasserstoff, schwerer
Deutsche Physik 178
Diagnose 220
Dialektik 230-232
Diffusion 19-21, 74, 75, 111, 204, 206
Draht 206
Drahtwurm 199

- Druck 21-25, 96, 122, 128, 138-140, 162, 168
 Druckerpresse 213
 Dünger 184, 189-192, 196
 Dynamit 95, 96, 109, 160
 Dynamo, siehe Generator
- Edelgase 38, 42
 Einsteinium 130
 Eisen 47, 101, 140, 145, 146, 153, 185, 186, 202-205
 Eiweiß 28, 68, 174, 187, 188
 Elektrolyse 72, 73
 Elektron (Grundsätzliches) 13, 31
 Elektronenbahn 32-36
 Elektrovalenz, siehe Valenz
 Element 36, 40, 54, 55
 Elementarladung 32
 Elementarteilchen 13, 14
 Emanation 61, 90, 174, 175, 203, 204, 225
 Erbanlagen 165
 Erdnüsse 192
 Erdöl 207
 Explosion, siehe Sprengstoff
- Fehlgeburten 164
 Fermium 130
 Fernheizkraftwerk 137, 153
 Festkörper 25-27, 31, 71, 72, 205
 Fisch 127, 128, 173, 174, 218
 Flugzeug 153, 154, 161
 Flüssigkeit 24-31, 72, 125, 138, 167, 168, 183, 209, 231, 232
 Fossilien, siehe Versteinerungen
 Funkenbildung 214
- Gammastrahlung (Grundsätzliches) 59, 66, 212
 Gas 17-25, 31, 71, 72, 125, 138, 167
 Gastein 145, 225
 Gasturbine 137
 Geiger-Zählrohr, siehe Zählrohr
 Generator 137, 148
 Gerichtsmedizin 221
 Getreidekäfer 219
 Gift (radioaktives) 164, 171-175
 Gitter (Kristalle etc.) 27-29, 118
 Glas 26, 28, 161, 169, 203
- Gleichgewicht, radioaktives 88-90
 Gold 80, 141, 144, 201
 Granit 63, 142, 145
 Graphit 111-125, 138, 139
- Haarausfall 164
 Halbwertszeit 60, 61, 88-91, 129, 220
 Halogene 38, 45
 Hämoglobin 185
 Heilmittel 217, 218
 Heizkraftwerk, siehe Fernheizkraftwerk
 Helium 50-52, 54-57, 59, 76, 80, 95, 97, 101, 125
 Heliummethode (Altersbestimmung) 68, 69
 Hochofen 96, 153, 202, 203
 Höhenstrahlung, siehe kosmische Strahlung
 Homogene Reaktoren 118, 128
 Hüttenwesen 202
- Idealismus 227-232
 Investition 148, 149, 152
 Ionen 35, 42, 62-64, 76, 77, 94, 214
 Ionenkammer 64
 Iridium 213
 Isotopentrennung 70-75, 114, 156
 Isotopie (Grundsätzliches) 52-54
- Jod 53, 101, 141, 164, 174, 195-197, 223
- Kabel 207, 217
 Kadmium 121, 122
 Kalium 38, 61, 70, 75, 139, 192, 194, 200, 201
 Kaliummethode (Altersbestimmung) 70
 Kalorie 87, 95
 Kalzium 41, 143, 164, 170, 174, 192, 196, 197
 Katalysator 98, 128
 Kautschuk 190, 206, 213, 214, 217
 Keramische Stoffe 203
 Kernbaustein, siehe Nukleon
 Kernkräfte, spezifische 97, 100, 102
 Kernladungszahl (Grundsätzliches) 32, 36-41, 47-59, 99-108, 129

- Kernreaktionen (Grundsätzliches)
 55-61, 75-80, 85-88, 94-118
 Kernspaltung (Grundsätzliches)
 90, 94-140, 155-174
 Kernspaltung, spontane 103, 104,
 122, 157
 Kettenreaktion 107-118, 127-134,
 155-159, 167, 172
 Klopffeind 221
 Knallgas 128
 Knochenmark 165
 Kobalt 80, 95, 171-174, 196-199,
 202, 206-208, 211, 212, 219, 222-224
 Kobaltbombe 80, 171
 Kochsalz 27, 184, 193
 Kohäsion 25, 100-102
 Kohlenasche 144
 Kohlenpreis 144, 147, 148, 150
 Kohlen säure 21, 81, 87, 125, 138, 186
 bis 189, 203
 Kohlenstoff (Moderator), siehe
 Graphit
 Kohlenstoff, radioaktiver, 81-84,
 186-189
 Kohlenstoff (und Kohle), Ver-
 brennung, 87, 95, 96, 106, 145
 bis 147, 153
 Kohlenstoffmethode (Altersbe-
 stimmung) 70, 81-84
 Kolm 142, 144
 Kontinuum 14, 16
 Kontrastmittel 198, 225
 Korrosion 127, 128, 135, 138
 Kosmische Strahlung 66, 69, 70,
 79, 81, 83, 104, 122, 157
 Kovalenz, siehe Valenz
 Kraftwagen 154, 206
 Kraftwerk 126, 134-140, 146-154,
 215
 Krebs 163-165, 171, 196, 197, 222
 bis 225
 Kreislauf, siehe Zirkulation
 Kristall 16, 17, 27-29, 205, 231, 232
 Kritische Größe 116, 117, 124, 140,
 157-159
 Kropf 195, 223
 Kühlung 119-125, 128, 133, 135-140,
 167, 168
 Kunststoffe 26, 28, 210, 214-221
 Ladungszahl, siehe Kernladungszahl
 Leben, siehe Biologie
 Lebensmittel 11, 217-219
 Lecksalz 198
 Leerer Raum 11, 31, 47
 Leerwert 66, 173
 Legierung 139, 140
 Leichtmetall 213
 Leuchtfarbe 197, 215, 216
 Leukämie 165
 Licht 16, 34, 35, 66, 78, 187-189,
 215, 216
 Lignin 190, 191
 Lithium 33, 38, 85, 167, 168
 Lokomotive 154
 Löslichkeit 183-185, 192
 Mammutbaum 82
 Mangan 53, 201
 Markierte Atome (Definition) 183
 Maschinenbau 205, 211
 Masse 47, 48, 78, 106
 Massenzahl (Grundsätzliches) 52,
 53, 56, 58, 85, 101
 Materialismus 227-232
 Maulwurf 199
 Medizin 185, 220-225
 Meer 23, 84, 128, 142, 163, 169, 173
 Mendeleevium 130
 Metall 45, 62, 202-207, 211-213
 Meteorit 69, 146, 201
 Minerale 62, 63, 69, 89, 91, 143
 Mischelement 53, 54
 Moderator 113-118, 120, 132, 156
 Molch 207
 Molekül (Grundsätzliches) 20-29, 41,
 45, 50, 72, 85, 231
 Monazit 145
 Mücke 22, 198, 199
 Mumie 82
 Natrium 38, 53, 133, 139, 140, 170,
 193-195, 198
 Nebelkammer 63
 Neptunium 129
 Neutron (Grundsätzliches) 48-57, 79,
 100-121
 Neutronendichte 117, 121, 122, 126,
 157

- Nukleon (Grundsätzliches) 48-56, 85, 86, 99-107, 230
 Oberflächenspannung 102, 103
 Ökologie 198
 Ordnungszahl (Definition) 32
 Organische Verbindungen 28, 45, 144, 186-191, 232
 Ozean, siehe Meer
 Panzer 66, 124, 163
 Papier 210
 Parasitäre Absorption 111, 121, 127
 Pechblende 142
 Periodisches System 36, 39, 40, 53
 Pflanze 186-193, 198
 Phasotron 77
 Phosphor 53, 78, 95, 191, 192, 196, 199, 223
 Photon 78
 Photoplatte 56, 62, 63, 65, 99, 206, 207
 Photosynthese 186-188
 Photozelle 66
 Pile 112
 Plastische Massen, siehe Kunststoffe
 Plutonium 111, 127, 129-136, 140, 143, 147, 156, 167, 170, 179, 197
 Polieren 207
 Polonium 56, 60, 61, 90
 Positron 78
 Prompte Neutronen 120, 121, 155
 Protaktinium 58
 Proton (Grundsätzliches) 13, 48, 57
 Pumpen 74, 75, 125, 139, 140, 152
 Quantentheorie 17, 31
 Quarz 28
 Quecksilber 21, 35, 80, 133, 139, 141, 220
 Rachitis 196, 197
 Radioaktive Indikatoren (Definition) 184
 Radioaktive Reihen 59, 61, 75, 89, 90
 Radiographie 171, 208-213
 Radioröhren 215
 Radium (Grundsätzliches) 56, 60, 66, 88, 163, 174, 197, 203
 Raketen 154, 177
 Raumschiffahrt 154
 Reaktion, chemische, 41, 44, 55, 72, 85-87, 95, 106, 109, 216, 217
 Reaktor (Grundsätzliches) 109, 112, 115-140, 229
 Reflektor 117, 118, 138, 139, 157
 Regelung von Reaktoren 120-122, 133
 Regenwasser 84, 174
 Reibung 23, 206, 213
 Reinelement 53, 54, 107
 Relativitätstheorie 106, 178
 Reproduktionsfaktor 110-116, 120 bis 123, 127, 131, 134, 155, 157, 172
 Rohstoffe (Atomenergie) 92-96, 141 bis 146, 175
 Röntgenstrahlen 28, 59, 165, 198, 212, 225
 Rostfreier Stahl 125, 139
 Rotation 29, 72
 Rubidium 60, 70
 Samarium 61
 Sauerstoff 21, 24, 45, 72
 Sauerstoff, schwerer 72
 Schädlinge 198, 217-219
 Schale 36, 38, 44
 Schiffe 153, 154, 174
 Schilddrüse 164, 195-197, 223
 Schlacke 145
 Schmieröl 205
 Schneehöhe 208
 Schneller Reaktor 132-133, 140, 155, 158
 Schwankungen 26, 61
 Schwerkraft 32
 Schwingung 28, 29, 72, 229, 230
 Seide 28
 Selbstdiffusion, siehe Diffusion
 Sirius 48
 Sonne 24, 33, 47, 69, 97, 98, 187
 Spaltprodukte 120-130, 157, 163, 170-175, 213, 216, 219, 220
 Speicherung (Radioelemente) 127 bis 130, 164, 174, 195-198, 223

- Sprengstoffe 96, 109, 119, 126-135,
 147, 156-160, 180
 Spurenelemente 192, 193, 196, 198
 Star 165
 Statistik 22
 Staub 63, 157, 164, 171-174
 Sterilisation 218, 219
 Sterilität 164
 Stoffwechsel 186-198
 Strahlenschutz 119, 121, 125, 127,
 139, 154
 Strontium 174, 197
 Synchrotron 76
 Szintillationsmethode 65
- Tantal 213
 Temperatur 15, 21-28, 77, 105, 134
 bis 140, 162, 166-168, 205, 231, 232
 Textilindustrie 213, 214
 Therapie 222-225
 Thermonukleare Reaktionen 97, 98,
 166
 Thorium 57, 67, 81, 92, 96, 99, 104,
 105, 132, 133, 141, 145, 146, 179, 200
 Thorotrast 225
 Thulium 213
 TNT, siehe Trotyl
 Transistor 215
 Transmutation 41, 80, 93
 Transurane 104, 130
 Trichinen 219
 Tritium, siehe Wasserstoff, über-
 schwerer
 Tröpfchenmodell 50, 102
 Trotyl 160, 169
- U-Boot 136, 153, 154
 Uran (Grundsätzliches) 24, 47, 56 bis
 61, 67, 75, 87-179
 Uranbrenner, siehe Reaktor
 Uranmeiler, siehe Reaktor
 Uranpechblende, siehe Pechblende
 Uranreaktor, siehe Reaktor
- Valenz 38, 42-45, 85
 Verbundnetz 149
 Vergiftung des Reaktors 127, 130
 Verlangsamung, siehe Bremsung
- Verschleiß 205
 Verseuchung 163-166, 170
 Versteinerung 67
 Verzinsung 138, 149, 150
 Verzögerte Neutronen 120, 121,
 133, 155
 Vitamine 196, 197, 218
 Viren 218
- Wärmeaustauscher, siehe Aus-
 tauscher
 Wärmelehre 16, 17
 Wärmetönung 87, 95, 96, 106
 Wasser, schweres, siehe Wasserstoff,
 schwerer
 Wasser, im Körper 194, 195
 Wasser, zur Kühlung 125, 128,
 138-140
 Wasserkraft 126, 152
 Wasserstoff (Grundsätzliches) 24, 25,
 33, 35, 45, 47-49, 85, 113, 114, 231
 Wasserstoff, schwerer 53, 71-73, 85,
 113-118, 123, 128, 166-168
 Wasserstoff, überschwerer, 71, 73, 80,
 83, 95, 167, 194, 195, 216
 Wasserstoffbombe 73, 98, 166-178
 Weglänge, freie 24
 Weichmacher 221
 Wein 84
 Weißblech 210
 Wertigkeit, siehe Valenz
 Wolfram 201
 Wolle 28
- Zählrohr 64, 65, 142, 173, 174, 185,
 199, 214, 215
 Zählung 64, 65
 Zellulose 191
 Zerfall, radioaktiver (Grundsätz-
 liches) 57-61, 67-70, 78-84, 87-95,
 101-109
 Zigaretten 211
 Zirkonium 125, 140
 Zirkulation 193-195
 Zucker 28, 29, 184, 187, 188
 Zündkerze 215
 Zündung der Bombe 157, 163, 167,
 168, 170
 Zyklotron 76, 77

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Textzeichnungen

Abb. 1: Die „Atome“ des Demokrit	13
Abb. 2: Diffusion bei Gasen	20
Abb. 3: Rauggitter des Kochsalzkristalls (schematisiert)	28
Abb. 4: Rauggitter des Kochsalzkristalls (im natürlichen Größenverhältnis)	28
Abb. 5: Atommodell des Elements Lithium	33
Abb. 6: Wie das Atom zum Ion wird	35
Abb. 7: Aufbau und stufenweise Auffüllung der Elektronenschalen mit zunehmender Elektronenanzahl (schematisch)	37
Abb. 8: Molekülbildung durch Elektrovalenz (schematisch)	43
Abb. 9: Molekülbildung durch Kovalenz (schematisch)	44
Abb. 10: Das Wasserstoffatom, einbillionmal vergrößert	49
Abb. 11: Der Mount Everest im Handkoffer	51
Abb. 12: Aufbau von Atomkernen aus Protonen und Neutronen	52
Abb. 13: Beispiel einer spontanen Kernreaktion.	55
Abb. 14: Betazerfall	58
Abb. 15: Geigersches Zählrohr (schematisch)	65
Abb. 16: Das Prinzip der Stufendiffusion zur Isotopentrennung	74
Abb. 17: Prinzip des Zyklotrons	77
Abb. 18: Analogie zwischen chemischen Reaktionen und Kernreaktionen	86
Abb. 19: Das radioaktive oder Zerfallsgleichgewicht (vereinfacht und schematisiert).	91
Abb. 20: Gestaltveränderung und Spaltung eines Atomkerns von hoher Kernladung	103

Abb. 21: Schematische Veranschaulichung einer Kettenreaktion von Kernspaltungen bei Uran 235	108
Abb. 22: Mögliche Schicksale der bei der Kernspaltung des Urans freigesetzten Neutronen im Reaktor	111
Abb. 23: Schematische Anordnung der wichtigsten Teile eines Reaktors	117
Abb. 24: Prinzip der Uran-Atombombe	159
Abb. 25: Wirkungsbereich der Atombombe von Hiroshima vom 6. August 1945	161
Abb. 26: Kontrolle der Dicke eines Werkstückes (eines Walzbandes) durch Strahlen während der Produktion	209
Abb. 27: Radiographie von Werkstücken	211
Abb. 28: Die „Kobalt-Kanone“	223
Abb. 29: Bestrahlung mit dem schwenkbaren Kobalt-Pendelgerät	224

Kunstdrucktafeln

<i>Boltzmann</i>	bei Seite	64
<i>Thomson und Rutherford</i>	„ „	65
<i>Mendelejew</i>	„ „	65
<i>Bahnspur eines Alphastrahls</i>	„ „	80
<i>Bahnspur eines Betastrahls</i>	„ „	80
<i>Zahlreiche Bahnspuren von Alphastrahlen</i>	„ „	81
<i>Spuren von Alphastrahlen in der Nebelkammer (Zusammenstoß mit Stickstoff-Atomkern)</i>	„ „	81
<i>Autoradiographie (Pechblende)</i>	„ „	128
<i>Zyklotron</i>	„ „	129
<i>Energieloser Reaktor „Zoë“</i>	„ „	129
<i>Ehepaar Joliot-Curie 1935</i>	„ „	144
<i>Joliot heute</i>	„ „	144
<i>Radiophosphor im Blatt einer Tomatenpflanze</i>	„ „	145
<i>Radiokalium und Radiophosphor in den Körpern zweier Ratten</i>	„ „	145
<i>Unterwasserexplosion einer Atombombe im Bikini-Atoll 1946</i> „ „	„ „	192
<i>Explosion der Wasserstoffbombe 1954</i>	„ „	193
<i>Wirkung der Atombombe von Hiroshima</i>	„ „	208 u. 209

Tabellen

Tab. I: Das Periodische System der Elemente	39
Tab. II: Zerfallsreihe des Uran 238	61
Tab. III: Altersbestimmung nach der Bleimethode (Zeittafel)	68
Tab. IV: Altersbestimmung nach der Kohlenstoffmethode	83
Tab. V: Radioaktives Gleichgewicht	90
Tab. VI: Wärmetönungen von Atomkern- und chemischen Reaktionen	95
Tab. VII: Verhältnis von Protonen und Neutronen in Atomkernen	101
Tab. VIII: Praktische Urangehalte von Erzen, Gesteinen und Meerwasser	142
Tab. IX: Stromkostenvergleich aus Atom- und Kohlenkraftwerk	150

Fehlerberichtigung während des Druckes

- Seite 55, Text zu Abb. 13, vorletzte Zeile:
statt *Neutron* richtig *Proton*,
letzte Zeile: statt *Proton* richtig *Neutron*.
- Seite 124, 5. Zeile von unten:
nach *Uran* ist einzufügen: , *selbst wenn es geschützt ist*,
- Seite 131, 2. Abs., vorletzte Zeile:
nach *Reaktor* ist einzufügen: *oder in einem mit langsamen Neutronen arbeitenden Reaktor*,
- Seite 139, 1. und 2. Zeile lauten richtig:
Graphit und 128 von rostfreiem Stahl umhüllten Rohren aus Uran, das auf 5% angereichert ist; die Temperaturen von Primär-

Andere Bücher des Verfassers

Advances in Radiochemistry

Cambridge University Press 1950
Auch in russischer, polnischer und ungarischer Übersetzung
Für Fachleute

Die Atomenergie

Globus-Verlag Wien 1950
Auch in ungarischer und polnischer Übersetzung
Volkstümlich

Kräfte des Weltalls

Globus-Verlag Wien 1954
Erscheint auch in ungarischer, polnischer und slowakischer
Übersetzung
Volkstümlich

Ludwig Boltzmann

Mensch — Physiker — Philosoph
Verlag Deuticke Wien 1955
Volkstümlich

Radioaktive Isotope in der Biochemie

Verlag Deuticke Wien. In Vorbereitung
Für Fachleute

Gemeinsam mit Th. Schönfeld:

Radiochemische Methoden der Mikrochemie
In: Handbuch der mikrochemischen Methoden.
Springer-Verlag Wien 1955
Für Fachleute

Technische Anwendungen der Radioaktivität

VEB Verlag Technik, Berlin, im Druck
Für Fachleute

Übersetzung:

Albert Einstein
Sein Werk und sein Einfluß auf unsere Welt
Von Leopold Infeld. Schönbrunn-Verlag Wien 1953
Volkstümlich





ZBPH



+P3806005