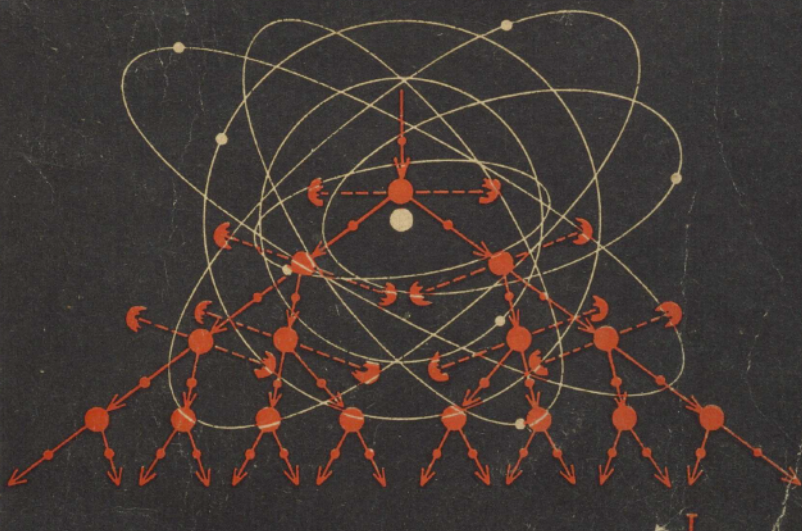


632 *E.B.*: Die Atomenergie - ihre Verwendung im Krieg und im Frieden,
Tagblatt Bibliothek, Globus Verlag, Wien 1950, 157 S. (Übersetzungen:
polnisch und ungarisch).

Digitalisiert mit freundlicher Genehmigung des Verlages.



ENGELBERT BRÖDA

Die Atomenergie
Ihre Verwendung im Krieg
und im Frieden



04439/152919

TAGBLATT-BIBLIOTHEK

2. Ex.



Herrn Prof. K. Przibram in
Bach und Verbreitung

TAGBLATT-BIBLIOTHEK NR. 1329

E. Prösch



04439/152719

2. Ex.

Dr. ENGELBERT BRODA

Dozent für physikalische Chemie an der Universität Wien

Die Atomenergie

Ihre Verwendung im Krieg
und im Frieden



1950

TAGBLATT-BIBLIOTHEK
IM GLOBUS VERLAG
WIEN



04439/132919

2. Ex.

Umschlagentwurf von Hans Thomas

Alle Rechte vorbehalten

Copyright 1950 by Globus, Zeitungs-, Druck- und Verlagsanstalt

Gesellschaft m. b. H., Wien

Gesamtausführung: Globus II, Wien VI

Vorbemerkung

Dieses Büchlein soll allgemein verständlich sein. Es setzt keine Kenntnisse voraus, die nicht durch die allgemeine Schule vermittelt werden. Das Kapitel, das sich mit der Bedeutung der Atomistik für die Chemie befaßt, mag sogar als überflüssig erscheinen. Es scheint jedoch dem Verfasser, daß die kurze Zusammenfassung der chemischen Grundtatsachen das Verstehen des Hauptteiles der Arbeit erleichtern wird.

Mancher Leser dieses Buches wird mit Thirrings schönem Buch „Die Geschichte der Atombombe“ Vergleiche ziehen wollen. Die Rechtfertigung für eine neue Darstellung der Probleme der Atomenergie liegt zum Teil darin, daß seit dem Erscheinen des genannten Buches bereits vier Jahre verstrichen sind. Diese Jahre haben sehr viel Neues, besonders im Hinblick auf die friedliche Verwendung der Atomenergie, gebracht. Der Besprechung der friedlichen Verwendung der Atomenergie wird daher hier weit mehr Platz eingeräumt als der Besprechung der militärischen Verwendung. Überhaupt muß manches Problem heute von einem anderen Standpunkt aus betrachtet werden, als dies noch 1946 möglich war.

Mit dem äußerst wichtigen Problem der Ächtung der Atomwaffe und mit jenem der Atomkontrolle befaßt sich dieses Büchlein bewußt nicht direkt. Es muß aber der Wunsch jedes Menschen sein, der diesen Namen verdient, daß dieses Doppelproblem bald wirksam gelöst wird.

Wien, im Mai 1950

Der Verfasser

I. Aus der Geschichte der Atomistik

I. Die antiken Atomisten

Der Gedanke, daß die Materie aus kleinsten Teilchen, den „Atomen“, bestehe, wurde zuerst von den griechischen Philosophen Leukipp und Demokrit aus Abdera gefaßt, die um das Jahr 420 v. Chr. lebten. Ihre Lehren, besonders die des (jüngeren) Demokrit, wurden später von dem Griechen Epikur und dem römischen Dichter Lukrez fortgeführt. Farrington¹⁾ 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 Denkern viel Kopfzerbrechen

¹⁾ Die im Text vorkommenden hochstehenden Ziffern [z. B. ¹⁾, ²⁾, ³⁾ usw.] beziehen sich auf die Literaturangaben im Anhang.

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.“ —

Über Lukrez schreibt ein Geschichtsschreiber²⁾:

„Aus dem imposanten Lehrgedicht des Lucretius Carus strömt uns 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 Fußstritten 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 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 Atome aufspalten lassen, die wirklichen Elementarteilchen dar. Dieser Umstand ändert aber an der Richtigkeit der Vorstellung Demokrits grundsätzlich gar nichts.

2. Die moderne Atomistik

Demokrit und seine Nachfolger konnten der Atomistik nicht zum endgültigen Durchbruch verhelfen. Statt dessen stand bis vor eineinhalb Jahrhunderten die „Kontinuum-Theorie“ der Materie im Vordergrund. Diese behauptete, daß die Materie nicht aus endlich kleinen, wenn auch winzig kleinen Teilchen (Atomen) zusammengesetzt, sondern daß die Materie 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 modernen Industrie seit Beginn der Neuzeit. Isaac Newton, der im 17. Jahrhundert wirkte, nahm den Ge-

danken 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 dem russischen Universalgenie des 18. Jahrhunderts, M. W. Lomonossow. Dieser Gelehrte betonte besonders, daß die Temperatur der Körper durch die Bewegungsenergie der Atome bestimmt ist.

Einen vollen Sieg erfocht die Atomistik im 19. Jahrhundert, als sich die Atomvorstellung besonders für die Chemie als ganz unentbehrlich erwies. Gerade die chemische Industrie (Soda- und Schwefelsäureerzeugung, Eisenmetallurgie, Zementfabrikation, Zuckerfabrikation) nahm vor 150 Jahren einen besonderen Aufschwung. Die Gesetze der Chemie lassen sich aber nur auf Grundlage der Atomistik verstehen. So bekehrten sich damals unter Führung John Daltons wohl alle Chemiker zur Atomistik. Die Physiker folgten ihnen in ihrer Mehrzahl. Zu den bedeutenden österreichischen Physikern des 19. Jahrhunderts, die zur Entwicklung der Atomistik beitrugen, gehörten Josef Stefan, der die Vermischung von Gasen (Diffusion) und die Wärmeleitung durch Gase atomistisch erklärte; sodann Josef Loschmidt, der als erster die Anzahl der in einem Kubikzentimeter eines Gases enthaltenen Atome berechnete. Der große Vorkämpfer der Atomistik unter den österreichischen Physikern des vorigen Jahrhunderts war aber der größte österreichische Physiker überhaupt: Ludwig Boltzmann (1844—1906).

3. Der Atomist Ludwig Boltzmann

In Boltzmanns „Populären Schriften“³⁾, 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!) 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 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.“

Allerdings wurde selbst zu Ende des 19. Jahrhunderts noch immer Widerspruch gegen die Atomistik laut; so glaubte der bekannte Wiener Physiker Ernst Mach nicht an die Atome. Machs Auffassungen wurden aber abgelehnt. Im 20. Jahrhundert ist die Atomistik Gemeingut der fortschrittlichen Wissenschaft in der ganzen Welt geworden. Auch bei uns in Österreich hat eine neue Generation von Physikern, zum großen Teil um das Wiener Radiuminstitut gruppiert, die Atomistik weiterentwickelt.

II. Die Atome und ihre Bewegung

1. Die Atome in Gasen

Gase sind dadurch gekennzeichnet, daß sie sich spontan über jedes Volumen ausbreiten, das ihnen zur Verfügung gestellt wird (*Abb. 1*).

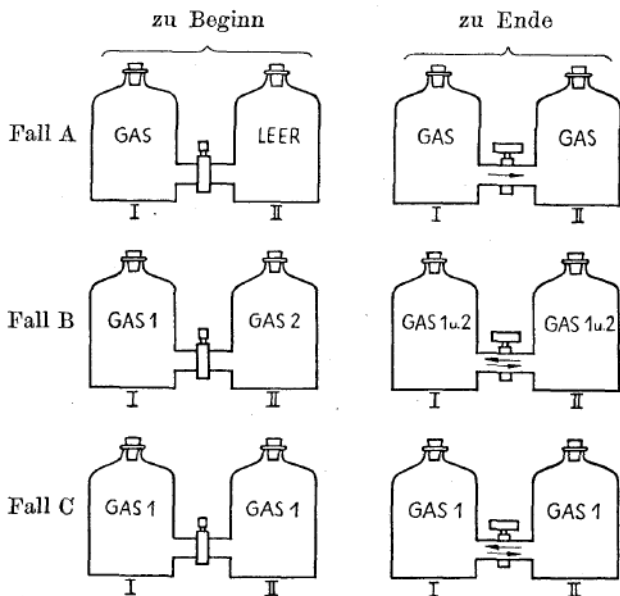


Abb. 1

Diffusion bei Gasen

Wenn z. B. (Fall A) der Hahn geöffnet wird, der ein gasgefülltes Gefäß I mit einem leergepumpten (evaku-

ierten) 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 im zweiten 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 also 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 und 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.

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 Volumen ursprünglich 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 bestehen also fast keine Kraftwirkungen. Zum Beispiel bestehen die Teilchen im Kohlendioxydgas, die sich gemeinsam und unabhängig vom Rest des Gases bewegen, aus Molekülen; dabei besteht in diesem Fall 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 Sauerstoffgases, 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 also der Verbindungshahn zwischen zwei Gefäßen geöffnet wird, die mit dem gleichen, aber unter verschiedenem Druck stehenden Gas gefüllt 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 der Diffusion zeigt, daß die Gas-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 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.

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 gerade 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 wichtiger Unterschied zwischen der Bewegung der Moleküle und jener 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. Da wir aber so viele Moleküle haben und alle Bewegungsrichtungen von vornherein gleich wahrscheinlich sind, merkt man normalerweise nichts von der Richtungsverschiedenheit. Zum Beispiel prallen an uns in jeder Sekunde Trillionen Luftmoleküle an. Da aber die Anpralle aus allen Richtungen erfolgen, hebt ihre Wirkung sich auf. Das Bombardement bleibt zum Glück unbemerkt. Freilich, wenn wir durch einen 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 $\frac{10^6}{100,000,000}$ ($= 1.06 \times 10^{-8}$) 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°) 7 Kilometer und bei der Temperatur des Sonneninneren (20 Millionen Grad) 400 Kilometer pro Sekunde. Beim absoluten

*) 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.

Nullpunkt der Temperatur (-273.1°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. Dies hatte schon Loschmidt annähernd genau errechnet. Jedes Molekül erleidet in der Sekunde durchschnittlich 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*.

2. 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, daß eine starke Tendenz der Moleküle zum Zusammenhalt (Kohäsion) besteht. Immerhin 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 dagegen zeigt, daß die Moleküle sich immerhin noch aneinander vorbeischieben können. Sie setzen also einer Gestaltänderung der Flüssigkeit keinen 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 $\sqrt[4]{100,000,000}$ ($= 4 \times 10^{-8}$) cm, in Wasser (Abstand der Wasserstoffatome) $\sqrt[2.5]{100,000,000}$ ($= 2.5 \times 10^{-8}$) cm. (Zum Vergleich: Dieser mittlere Abstand beträgt in Wasserstoffgas bei Atmosphärendruck etwa $\sqrt[3.3]{100,000,000}$ ($= 3.3 \times 10^{-7}$) cm, kann aber je nach dem Druck jeden nur möglichen Wert annehmen.) Man erkennt also, daß dieser mittlere Abstand in Flüssigkeiten ungefähr mit dem Durchmesser der Atome (siehe Abschnitt II, 1) 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 ändern müssen, 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 Pendel- oder *Schwingungsbewegung* um gewisse Lagen, ausführen. Während jeder Schwingung wird ein Weg von der Größenordnung $\sqrt[1]{100,000,000}$ ($= 10^{-8}$) cm zurückgelegt.

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 *Brown'schen Bewegung* auch zahlenmäßig ableiten.

Im wissenschaftlichen Sinn 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.

3. Die Atome in Festkörpern

Der feste Körper stellt die Anordnung der Materie-
teilchen dar, 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 diese Moleküle die
Kräfte zwischen ihnen am besten abgesättigt sind.
Während also das Volumen eines Gases von den Um-
ständen 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 einer Formänderung keinen Widerstand entgegensetzen. Die Orte der Moleküle einer Flüssigkeit sind also nicht festgelegt, während die Moleküle im Festkörper 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 Teilchen (es handelt sich in diesem Fall um die elektrisch geladenen Atome des Natrium und des Chlors) $2^{28}/_{100,000,000}$ ($= 2.8 \times 10^{-8}$) cm. In *Abb. 2* 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 infolge ihrer elektrischen Anziehung einander berühren, wie es in *Abb. 3* dargestellt ist. — Andere Stoffe bilden kompliziertere.

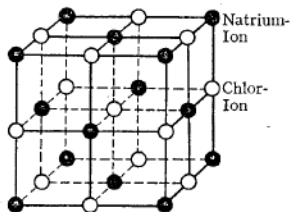


Abb. 2

Raumgitter des Kochsalzkristalls (schematisiert)

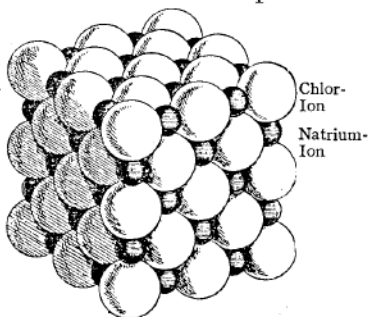


Abb. 3

Raumgitter des Kochsalzkristalls (in natürl. Größenverhältnissen)

Gitter. Einen festen Körper, dessen Teilchen in einem zusammenhängenden Gitter angeordnet sind, bezeichnet man als einen *Kristall*.

Wenn der Bereich, innerhalb dessen die regelmäßige Anordnung 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.

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. Wie bei Flüssigkeiten, kann auch bei den Festkörpern (Kristallen) die Bewegungsenergie der Moleküle nur Schwingungsenergie sein, wenn die Teilchen ihre mittlere gegenseitige Entfernung und ihre Anordnung nicht ändern sollen. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Schwingung an Heftigkeit zu, so daß schließlich die Regelmäßigkeit und damit das Kristallgitter zerstört wird: Der Kristall „schmilzt“.

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.

III. Der innere Aufbau der Atome

1. Das Planetenmodell des Atoms

Die Theorie der Gase, Flüssigkeiten und Festkörper, die wir im Abschnitt II 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 einfach als harte elastische Kügelchen aufgefaßt.

Die heute gültige Theorie des inneren Aufbaues des Atoms wurde seit dem Jahre 1911 von Ernest Rutherford (*Abb. 4*) 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 zwanziger Jahren 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-Rutherford'sche 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 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

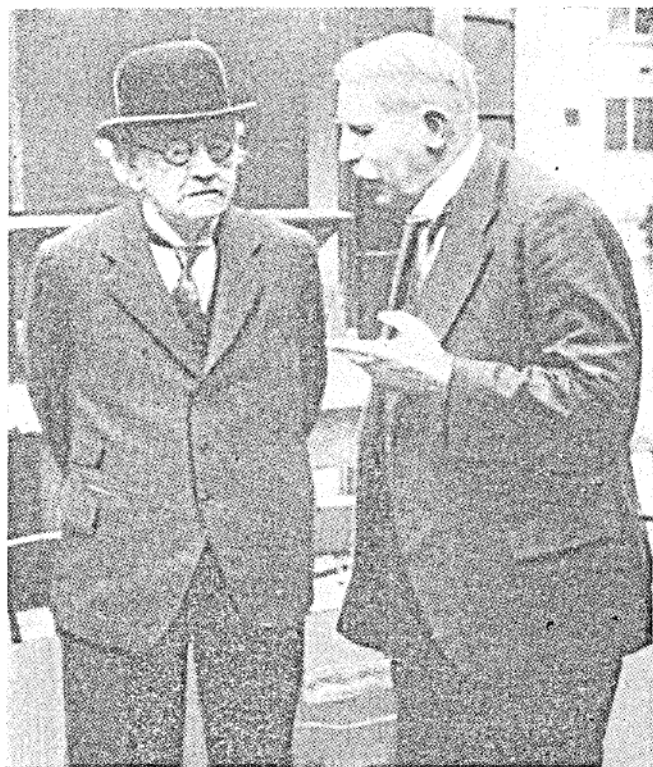


Abb. 4

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

(Aus „The Cavendish Laboratory“ von Alexander Wood)

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 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 0.000000000000000000016 ($=1.6 \times 10^{-19}$) Ampère-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 Kreisbahnen 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 aus Wien stammende 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 entgegengesetzter Richtung 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 Stabilität der Elektronenbahn infolge der hier intensiver wirkenden elektrischen Anziehungskraft in höherem Maße gewährleistet ist 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 Elektronenbahnen im Normalzustand eines einfach gebauten Atoms, nämlich jenes des Elementes Lithium. Kernladungszahl und Elektronenzahl dieses Elementes betragen 3. Der Kern ist einfach als Kreis mit hineingeschriebener Ladungszahl dargestellt. Zwei der Elektronen kreisen in der gleichen (der kreisförmigen) Bahn.

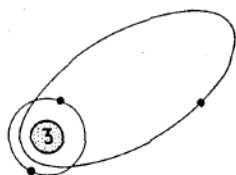


Abb. 5

Atommodell des Elementes Lithium

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 Umlaufgeschwindigkeit sein, damit es nicht in den Atomkern stürze. Ähnlich liegen die Verhältnisse ja auch in unserem Sonnensystem, wo die Geschwindigkeit 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.

2. 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 Anziehungskraft des Kerns 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. 6a), gänzlich entfernt worden ist, verbleibt ein einfach positiv geladener Atomrest, im Falle des Wasserstoffatoms also der Atomkern (Abb. 6b). Dieser wird als ein (positives) *Ion* bezeichnet. Das freigemachte Elektron lagert sich leicht an ein Atom bestimmter Art an und verleiht ihm dadurch eine negative Überschussladung: Es verwandelt das betreffende Atom, z. B. ein elektrisch neutral gewesenes Wasserstoffatom, in ein (negatives) Ion (Abb. 6c). *Ionen sind also elektrisch geladene Atome.* — Durch Entfernung mehrerer Elektronen

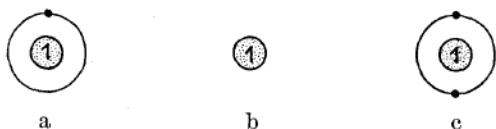


Abb. 6

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

aus einem Atom — oder durch Anlagerung mehrerer Elektronen an ein Atom — entstehen mehrfach geladene Ionen.

3. 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 bekannte Kernladungszahl beträgt 96; daher gibt es 96 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 die 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 aus Abschnitt III, 2, 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 zusammenschließt. 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 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.

Wie macht sich nun diese Schalenstruktur bemerkbar? Nun: Sie drückt sich darin aus, daß verschiedene Elemente verschiedene Eigenschaften aufweisen. Vor allem sind die Elektronenschalen für die *chemische* Natur der Elemente bestimmend. Es zeigt sich nämlich, daß voneinander 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. Die chemischen Umwandlungen betreffen daher nur die Elektronen außerhalb der letzten abgeschlossenen Schale; so ist es verständlich, daß es die Anzahl dieser reaktionsfähigen Außenelektronen (*Valenz-Elektronen*) 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. Sie wirken auch auf ihresgleichen nur sehr wenig ein. Wegen der geringen Anziehungskräfte zwischen den Atomen sind sie meist gasförmig. Da Trägheit und abweisender Charakter anscheinend als edel gelten, nennt man diese Elemente *Edelgase*. Die Edelgase mit den Ladungszahlen 2, 10, 18 heißen Helium, Neon, Argon.

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 gegenüber den Edelgasen genau ein Außenelektron.

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 Klar-

Zu nebenstehender Abb. 7:

Aufbau und stufenweise Auffüllung der Elektronenschalen mit zunehmender Elektronenanzahl (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 ellipsoidischer Gestalt und liegen auch nicht in einer Ebene (wie hier in der Papierebene), sondern sie lagern sich, ähnlich wie Zwiebelschalen, räumlich um den Atomkern.



















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

Abb. 7

heit zuerst von Dimitri Mendelejew (Abb. 8). im Jahre 1869 erkannt. Mendelejew ist der Urheber des berühmten *Periodischen Systems der Elemente* (Tabelle I,

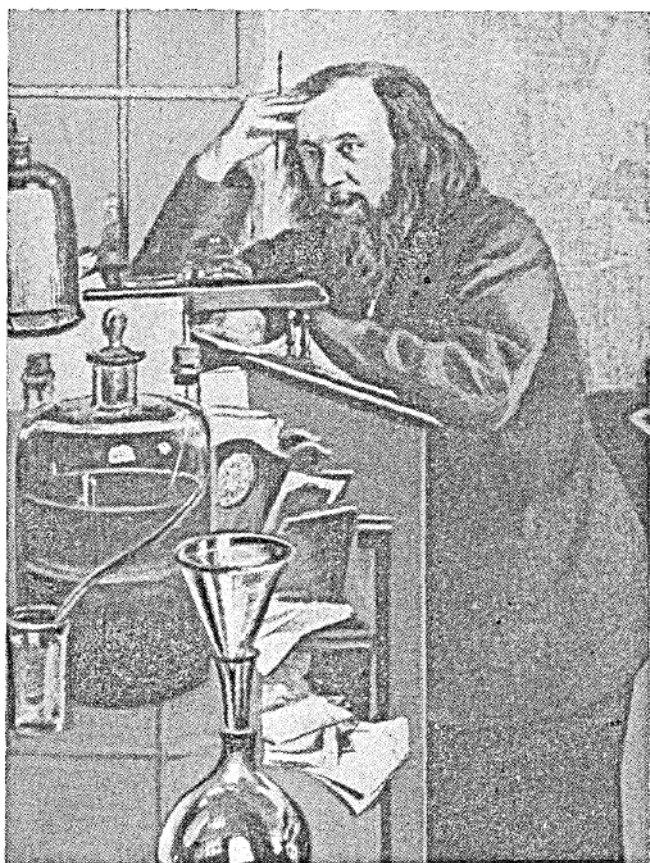


Abb. 8

Dimitri Mendelejew, der Schöpfer des Periodischen Systems der Elemente

Seite 36). 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. Das Atomgewicht eines Elements gibt an, wievielfach 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 in Abschnitt IV erläutert werden). Infolgedessen gehen im allgemeinen Ladungszahl (in der Tafel 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 chemischen Ähnlichkeit mit Magnesium zwanglos unterhalb dieses Elements in der gleichen Kolonne. Das nächstschwerere damals bekannte Element (Titan mit dem Atomgewicht 48)

¹ H 1.0 Wasserstoff																					² He 4.0 Helium	
³ Li 6.9 Lithium	⁴ Be 9.0 Beryllium	⁵ B 10.8 Bor	⁶ C 12.0 Kohlenstoff																			¹⁰ Ne 20.2 Neon
¹¹ Na 23.0 Natrium	¹² Mg 24.3 Magnesium	¹³ Al 27.0 Aluminium	¹⁴ Si 28.1 Silicium																			¹⁸ Ar 39.9 Argon
¹⁹ K 39.1 Kalium	²⁰ Ca 40.1 Calcium	²¹ Sc 45.1 Scandium	²² Ti 47.9 Titan	²³ V 51.0 Vanadium	²⁴ Cr 52.0 Chrom	²⁵ Mn 54.9 Mangan	²⁶ Fe 55.8 Eisen	²⁷ Co 58.9 Kobalt	²⁸ Ni 58.7 Nickel	²⁹ Cu 63.6 Kupfer	³⁰ Zn 65.4 Zink	³¹ Ga 69.7 Gallium	³² Ge 72.6 Germanium	³³ As 74.9 Arsen	³⁴ Se 79.0 Selen	³⁵ Br 79.9 Brom						³⁶ Kr 83.7 Krypton
³⁷ Rb 85.5 Rubidium	³⁸ Sr 87.6 Strontium	³⁹ Y 88.9 Yttrium	⁴⁰ Zr 91.2 Zirkonium	⁴¹ Nb 92.9 Niobium	⁴² Mo 96.0 Molybdän	⁴³ Tc 98.0 Technetium	⁴⁴ Ru 101.7 Ruthenium	⁴⁵ Rh 102.9 Rhodium	⁴⁶ Pd 106.7 Palladium	⁴⁷ Ag 107.9 Silber	⁴⁸ Cd 112.4 Cadmium	⁴⁹ In 114.8 Indium	⁵⁰ Sn 118.7 Zinn	⁵¹ Sb 121.8 Antimon	⁵² Te 127.5 Tellur	⁵³ I 126.9 Jod						⁵⁴ Xe 131.3 Xenon
⁵⁵ Cs 132.9 Caesium	⁵⁶ Ba 137.4 Barium	⁵⁷⁻⁷¹ Seltene Erden	⁷² Hf 178.6 Hafnium	⁷³ Ta 180.9 Tantal	⁷⁴ W 183.9 Wolfram	⁷⁵ Re 186.3 Rhenium	⁷⁶ Os 190.2 Osmium	⁷⁷ Ir 193.1 Iridium	⁷⁸ Pt 195.2 Platin	⁷⁹ Au 197.2 Gold	⁸⁰ Hg 200.6 Quecksilber	⁸¹ Tl 204.4 Thallium	⁸² Pb 207.2 Blei	⁸³ Bi 209.0 Wismut	⁸⁴ Po** Polonium	⁸⁵ At** Astatin						⁸⁶ Fm** Emanation
⁸⁷ Fr** Francium	⁸⁸ Ra* Radium	⁸⁹ Ac** Actinium	⁹⁰ Th* Thorium	⁹¹ Pa** Protactinium	⁹² U* Uran																	

Anmerkungen: Die Elemente 43 und 61 kommen in der Natur nicht vor. Die Elemente 57-71 (Seltene Erden) müssen in der gewählten Darstellung des Periodischen Systems auf einen Platz untergebracht werden.

* Radioaktive Elemente, die in der Natur in Gramm-Quantitäten aufgefunden werden.
** Radioaktive Elemente, die nur in sehr kleinen Mengen natürlich auftreten.

⁹³ Np Neptunium	⁹⁴ Pu Plutonium	⁹⁵ Am Americium	⁹⁸ Cm Curium
-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	----------------------------

(siehe Abschnitt VII, 6)
ist das letzte Wort noch nicht gesprochen.

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 fehlen, d. h. noch nicht aufgefunden sein müsse. 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, die heute überholt ist, war im 19. Jahrhundert nicht ungesund. Sie trug zur Entwicklung der Chemie bei.

4. Die Bildung chemischer Verbindungen

Seinen hauptsächlichsten 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 Wasserstoff-superoxyd gebunden wird, genau im einfachen ganz-

zahligen Verhältnis 1 : 2. Andere 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 in Abschnitt III, 1, 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 (*Abb. 9a*). Im festen Zustand ordnen sich diese Ionen in einem Kristallgitter (*Abb. 2* und *3*, Seite 22) an. Wenn die beiden Reaktionspartner gegenüber dem im Periodischen System benachbarten Edelgas *zwei* Elektronen zuviel bzw. zuwenig haben (z. B. Magnesium und Sauerstoff), so übersiedeln bei Bildung der Verbindung *zwei* Elektronen

(Abb. 9b). Solche Elemente werden als *zweiwertig* bezeichnet, während Natrium und Chlor *einwertig* sind.

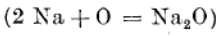
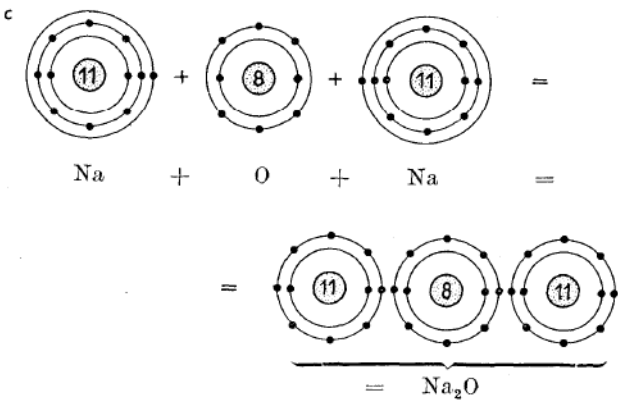
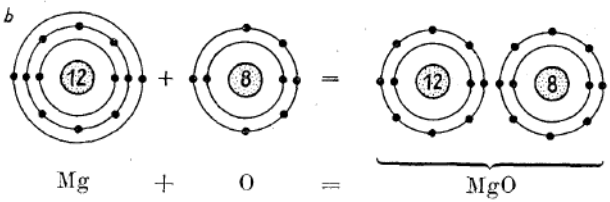
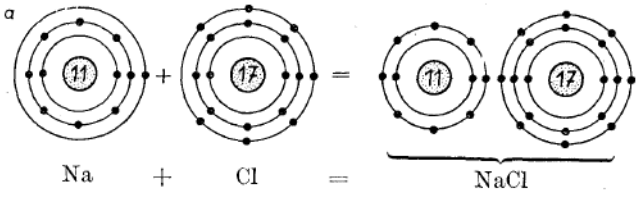


Abb. 9

Molekülbildung durch Elektrovalenz (schematisch)

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 restlos erfolgen kann (*Abb. 9c*). Diese Reaktionen sind in *Abb. 9* schematisch 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 fernerstehen. Kovalente Verbindungen kommen dadurch zustande, daß Außenelektronen in den *gemeinsamen Besitz* der miteinander sich 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. — Besonders wichtig sind auch die durchwegs *kovalent* gebauten *organischen Verbindungen*. Als *organisch* bezeichnet man Moleküle, die an Kohlenstoff gebundenen Wasserstoff enthalten. *Abb. 10a* zeigt rein schematisch die Bildung eines Wasserstoffmoleküls aus zwei Wasserstoffatomen und *Abb. 10b* die Bildung von Methan (Sumpf- oder Grubengas) aus einem Kohlenstoffatom und vier Wasserstoffatomen.

Neben den elektrovalenten und den kovalenten Ver-

bindungen sind noch Verbindungen von anderem Typus, z. B. die *metallischen* Verbindungen, bekannt.

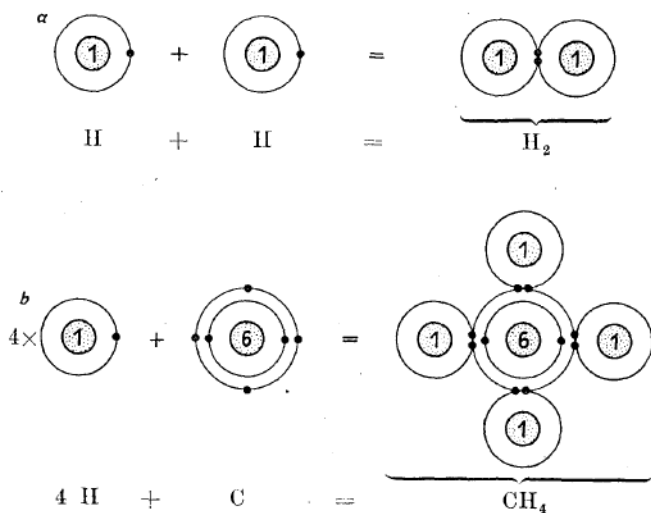


Abb. 10

Molekülbildung durch Kovalenz (schematisch)

IV. Die Atomkerne

1. 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 Halbmesser des kleinsten Atomkernes, des Kernes des Wasserstoffatoms (Kernladungszahl 1), $\frac{1}{10.000.000.000.000}$ ($= 1 \cdot 5 \times 10^{-13}$) cm ausmacht; der Halbmesser des größten natürlich vorkommenden Atomkernes, des Kernes des Uranatoms (Kernladungszahl 92), beträgt etwa $\frac{1}{1.000.000.000.000}$ ($= 10^{-12}$) cm, also etwa das Sechsfache. Das Atom besteht also, ähnlich wie das Sonnensystem, zum allergrößten Teil aus „leerem“ Raum, nämlich aus Zwischenräumen, die im Verhältnis zu Atomkern und Elektronen ungeheuer groß sind (vgl. Seite 24).

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 Kernes, des Kernes des Wasserstoffatoms. Daher ist die Masse des Wasserstoffatoms, in dem ein Elektron kreist, zu etwa 99,95% im Mittelpunkt, also im Atomkern, konzentriert.

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 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 Rutherfords und hatte auf das Neutron gewissermaßen nur „gewartet“.

In *Abb. 11* 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 Wasserstoff je 1, für leichtes und für schweres Helium aber je 2. — Die Ladungszahl gibt uns nach Abschnitt III, 1, 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 ständig wechselt. Niels Bohr

	● Proton			
	○ Neutron			
<i>Abb. 11</i>	a	b	c	d
	●	●○	●●○	●●○●
Massenzahl:	1	2	3	4
Kernladungszahl:	1	1	2	2

Aufbau von Atomkernen aus Protonen und Neutronen.

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 Helium ($\begin{smallmatrix} 3 \\ 2 \end{smallmatrix} \text{He}$);

d 2 Protonen + 2 Neutronen —

Kern des gewöhnlichen Helium ($\begin{smallmatrix} 4 \\ 2 \end{smallmatrix} \text{He}$).

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. Abschnitt II, 2), 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. 11* anlegen müßte, um die Zusammensetzung von Atomkernen anzugeben. Man begnügt sich daher praktisch, ebenso wie in der Chemie, mit einer einfachen Symbol- oder Formelsprache. Zum Beispiel werden die in *Abb. 11* 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. Immerhin schreibt man noch zur Verdeutlichung das chemische Symbol des Atoms hin, das den betreffenden Kern enthält: in unserem Falle H und He. Dies ist aber eigentlich überflüssig, denn die chemischen Eigenschaften des Atoms sind durch die Protonenanzahl allein bestimmt. Ein Kern mit einem Proton kann ja keine anderen chemischen Eigenschaften als die des Wasserstoffes, ein Kern mit zwei Protonen keine anderen als die des Helium haben.

2. Isotope

Allerdings kann man feststellen, daß verschieden aufgebaute Atomkerne doch gleiche Elektronenhüllen mit gleicher Elektronenanzahl besitzen können — eben wenn die Kernladungszahl gleich, aber die Neutronenzahl und damit auch die Massenzahl verschieden ist. 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 allgemein als *Isotope* bezeichnet. Aus Abschnitt III, 3, 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 schon sehr genaue Experimente anstellen, um auch nur den mindesten Unterschied in chemischen Verhalten 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.

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 $\left(\begin{smallmatrix} 23 \\ 11 \end{smallmatrix} \text{Na}\right)$, der Phosphor $\left(\begin{smallmatrix} 31 \\ 15 \end{smallmatrix} \text{P}\right)$, das Mangan $\left(\begin{smallmatrix} 55 \\ 25 \end{smallmatrix} \text{Mn}\right)$ und das Jod $\left(\begin{smallmatrix} 127 \\ 53 \end{smallmatrix} \text{J}\right)$ nur aus je einem Isotop. Die Anzahl der Neutronen ist damit in allen Kernen eines jeden dieser Elemente genau festgelegt (12, 16, 30, 74) und ist jeweils gleich der Differenz der Massenzahl und der Ladungszahl.

Wir halten also fest: (I) *Massenzahl* = Zahl der Nukleonen; weiters: (II) *Atomgewicht* = (annähernd)

Gewicht, bezogen auf Gewicht des (leichten) Wasserstoffatoms (vgl. Abschnitt III, 3); 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 Wasserstoffes) 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 36) bestätigt diesen Sachverhalt. Zum Beispiel für die genannten vier Reinelemente sind 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 streng ganzzahlig sind, wird uns in Abschnitt VI, 4, 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 Isotopen eines jeden Elementes auch während der Erdgeschichte stets im gleichen Verhältnis durchmischt geblieben, so daß die *Durchschnittsatomgewichte* unabhängig von der Herkunft einer Probe des Elementes 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.

3. Stabile und instabile Atomkerne — Radioaktivität

Heute kennt man Atomkerne mit Protonenzahlen zwischen 1 und 96; mit ihren Elektronenhüllen entsprechen diese Kerne den Atomen der sechsundneunzig bekannten Elemente (siehe Periodisches System, Seite 36). 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.

Alle Elemente der Ladungszahlen 1–92, mit Ausnahme von 43 und 61, sind in der Natur aufgefunden worden; die Elemente Nr. 43 und 61 ebenso wie die sogenannten Transurane mit den Kernladungszahlen 93, 94, 95 und 96 wurden künstlich erzeugt. Allerdings ist die Häufigkeit der Elemente — d. h. der Kerne bestimmter Ladungszahl — sehr verschieden. Zum Beispiel sind die Atome des Sauerstoffs, eines besonders häufigen Elementes, in der Erdkruste 300mal häufiger als die Atome des Elementes Schwefel. Dabei gehört der Schwefel noch nicht zu den selteneren Elementen. 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 vor Milliarden von Jahren aus Protonen und Neutronen leichter gebildet haben als instabile.

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. 9, 10). Ein einfaches Beispiel einer spontanen Kernreaktion ist in Abb. 12 dargestellt.

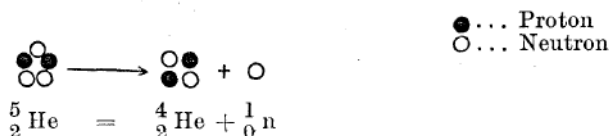


Abb. 12

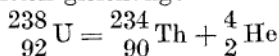
Beispiel einer spontanen Kernreaktion

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.

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. 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.

Diese spontanen Kernreaktionen sind als *radioaktive Reaktionen* bekannt. Die *Radioaktivität* wurde im Jahre 1896 von Becquerel in Paris entdeckt, als er photographische Platten mit *Uranverbindungen* in Berührung brachte und nach einiger Zeit eine Schwärzung der entwickelten Photoplatten feststellen konnte. Die Beobachtungen Becquerels 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 Form und von experimentellen Umständen. Die Curies fanden weiter, daß das Uranpräparat auch radioaktive Stoffe enthält, die chemisch vom Uran verschieden sind. Sie machen zwar nur einen kleinen Teil vom Gewicht des Uranpräparats 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 zu extrahieren. Zu diesen Stoffen gehören vor allem das von Marie Curie zu Ehren ihrer durch den Zarismus unterdrückten Heimat Polen benannte *Polonium* und das *Radium*. Der Name Radium ist vom lateinischen „radius“ (= Strahl) abgeleitet. Das Uranerz, das den Curies als Ausgangsmaterial 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.

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. 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. Wieder gilt $238 = 234 + 4$ und $92 = 90 + 2$. Bei diesem Zerfall entsteht also ein Heliumkern. Er wird mit großer Wucht aus dem Kern 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 Abschnitt IV, 4.)

Der neu entstandene Kern ${}_{90}^{234}\text{Th}$ ist nun auch nicht stabil. Er unterliegt also selbst wieder einem Zerfall. Doch ist die Zerfallsreaktion dieses Kerns von anderer Art als der vorangegangene Uranzerfall. Die Zerfallsreaktion des Kerns ${}_{90}^{234}\text{Th}$ 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. Da aber, soweit wir wissen, die Gesamtsumme an Ladung in der Welt sich niemals ändert, muß das Entstehen dieser positiven Ladung durch das gleichzeitige Entstehen einer negativen Ladung wettgemacht werden. Andererseits aber kann bei diesem Vorgang mit der entstehenden negativen Ladung nur eine sehr geringe Masse verbunden sein: Denn auch die Summe der Massen in der Welt muß konstant bleiben (Erhaltung der Materie!), und Proton und Neutron sind ja nahezu gleich schwer. Also kann bei ihrer Umwandlung praktisch keine Masse entstehen. Ein Teilchen, das den beiden 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 also stets mit der Aussendung eines Elektrons

verbunden, wie es in *Abb. 13* angedeutet ist. Dieses bewegte Elektron ist als *Betateilchen* bekannt, die Er-

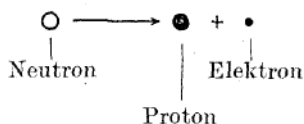
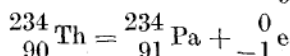


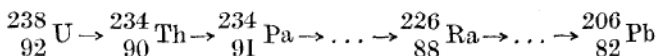
Abb. 13
Betazerfall

scheinung heißt *Betazerfall*. Beim Betazerfall ändert sich die Massenzahl (oberer Index) nicht, da die Massenzahl des Betateilchens (*Elektron*) 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 ${}^{234}_{90}\text{Th}$ lautet also:



Pa ist das chemische Symbol des Elementes 91 (*Protaktinium*). — Das Produkt dieses Zerfalls, der Kern ${}^{234}_{91}\text{Pa}$, unterliegt wieder einem Betazerfall, sein Produkt ${}^{234}_{92}\text{U}$ 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 hier besprochenen Zerfall des Kerns ${}^{238}_{92}\text{U}$ eingeleitet wird, ist ein Kern des *Bleiisotops* ${}^{206}_{82}\text{Pb}$:



Die beim Zerfall der Glieder einer radioaktiven Reihe emittierten Alphateilchen (Heliumkerne) und Betateilchen (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 nur auf der Energie dieser Teilchen. Sie leben dann als Kern eines gewöhnlichen Heliumatoms bzw. als gewöhnliches Elektron fort.

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 verschieden 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 Substanz den gleichen Wert, ob die Substanz nun im Eiskasten oder in einem Glühofen, im luftleeren Raum oder unter einer hydraulischen Presse, in Form des Elementes oder als chemische Verbindung aufbewahrt wird. Übrigens zerfällt — streng genommen — 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. — aber theoretisch wird niemals die gesamte Stoffmenge zerfallen sein.

4. 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 Alphastrahl von Polonium, wenn er gleich einer Kanonenkugel durch Luftatome saust, im Durchschnitt etwa 150.000 Atome je eines Elektrons. Die Elektronen werden aus den Atomen herausgeboxt, d. h. die Atome werden in Ionen verwandelt. Einen „Stoß“ von 150.000 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, indem sie in der photographischen Emulsion Ionen erzeugen, 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 (*Abb. 14*) oder ein Betastrahl (*Abb. 15*) erzeugt. Aus der Zahl, Länge und Form der Spuren kann man schließen, wieviel radioaktiver Stoff anwesend ist, was die Energie der Strahlung ist und ob es sich um Alpha-, Beta- oder sonstige Strahlen handelt.

Die *Nebelkammermethode* ist der Photomethode insofern nicht unähnlich, als auch sie ein unmittelbar an-

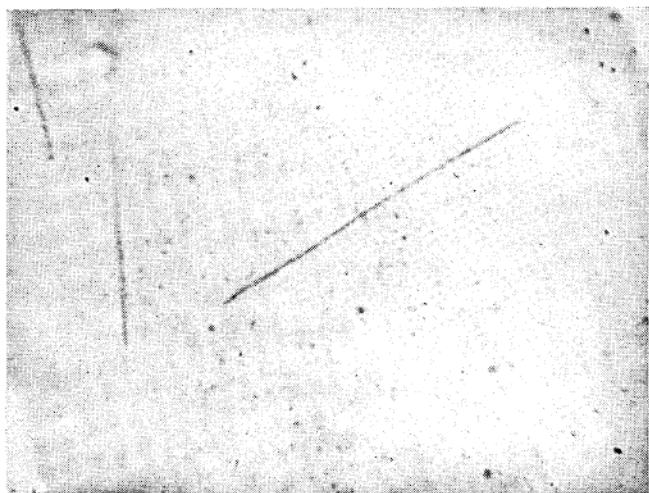


Abb. 14

Bahnspur eines Alphastrahls in einer photographischen Emulsion

Die radioaktive Substanz war in die Gelatine eingelagert worden. — Die undeutlichen Bahnspuren links liegen in einer anderen Ebene und erscheinen daher unscharf. Die isolierten Körner sind vom Prozeß der Emulsionsherstellung her oder durch Streustrahlung geschwärzt. 1000fache Vergrößerung.

(Aufnahme Jenkner und Broda)

schauliches Bild des Einzelvorganges liefert. Sie wurde zu Anfang unseres Jahrhunderts von Wilson eingeführt und wird bis zum heutigen Tag, besonders auch bei der Erforschung der kosmischen Strahlung, viel verwendet. Die 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.

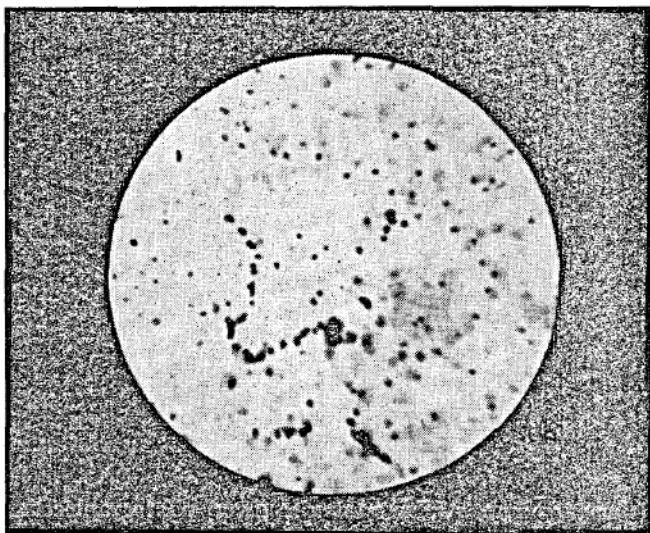


Abb. 15

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)

Wilson fand nun, daß diese Kondensation zu Tröpfchen normalerweise nicht augenblicklich bei Überschreitung der Sättigungskonzentration erfolgt. Vielmehr braucht der übersättigte Dampf „Hilfe“ bei der Kondensation. 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 fernge-

halten 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 (Abb. 16).

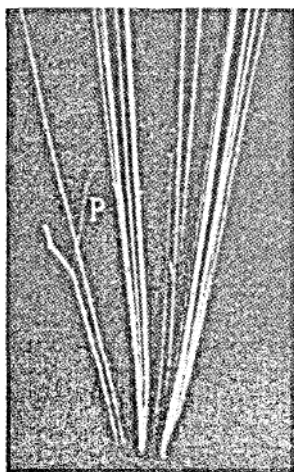


Abb. 16

Spuren von Alphastrahlen
in der Nebelkammer

Durch einen der Alphastrahlen (ganz links) ist ein Stickstoff-Atomkern 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)

Wenn sie von mehreren Seiten gleichzeitig photographiert werden, erhält man schöne stereoskopische Bilder.

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 Strahlungsbahn nicht sichtbar, aber man kann aus der Größe des Stromstoßes direkt die Zahl der in der Kammer erzeugten Ionen und daraus wieder die Energie der Strahlung erschließen.

Die vierte, am häufigsten angewandte Methode des Strahlungsnachweises stellt eine Weiterentwicklung der eben besprochenen dritten Methode dar. Es ist die Methode des (Geiger-)Zählrohres. 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 Ionen solche Geschwindigkeiten 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 Ionen werden ebenfalls durch das elektrische Feld in Bewegung gesetzt, wirken ihrerseits 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. Dafür aber ist der Stromstoß in jedem Fall so mächtig, daß auch Strahlen sehr geringer Energie mit Sicherheit nachgewiesen („gezählt“) werden können.

Alle Meßgeräte registrieren natürlich auch Strahlen, die den stets vorhandenen radioaktiven Beimengungen der Werkstoffe, der Umgebung des Gerätes, ja sogar der Luft usw. entstammen. Auch die kosmische Strahlung (Höhenstrahlung oder Ultrastrahlung) wirkt auf die Geräte ein. Man kann sie gegen diese unerwünschten Einwirkungen wenigstens teilweise dadurch schützen, daß man sie mit einem Bleipanzer umgibt, der die meisten Strahlen abhält.

5. Altersbestimmung auf Grund der Radioaktivität

Die völlige Unabhängigkeit der Zerfallsgeschwindigkeit radioaktiver Stoffe von den äußeren Umständen ist die Grundlage einer einfachen und verlässlichen Me-

thode zur Bestimmung des Alters von Gesteinen. Man weiß, welcher Bruchteil einer Uranmenge pro Jahr zerfällt, also sich letzten Endes in Blei verwandelt. Wenn man nun in einem Gestein einerseits den Urangehalt, 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 etwa schon zu Beginn gewöhnliches Blei enthalten hat, und ferner, daß das Gestein keinen durch Bodenwasser bewirkten Laugungsvorgängen ausgesetzt war. Immerhin lassen sich diese Möglichkeiten im allgemeinen praktisch ausschließen.

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 II* sind einige mittels der „Radiomethode“ erhaltene Daten zusammengestellt. Sie zeigen, in welchen Erdperioden neue Arten von Lebewesen zuerst aufgetreten sind.

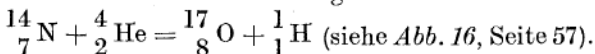
Tabelle II

Geologische Epoche	Erstes Auftreten von	Alter der Epoche in Millionen Jahren	
Vorkambrium	} Wirbellosen Fischen Reptilien einfachen Säug- tieren	2000 bis 470	
Kambrium			
Silur			
Karbon			340
Trias			240
Jura	} Vögeln Halbaffen Affen Menschenaffen Menschen	160	
Eozän		120	
Oligozän		60	
Miozän		45	
Pleistozän		30	
		1	

6. Künstliche Kernreaktionen

Zwischen 1896 und 1919 waren nur spontane Kernreaktionen bekannt. Es war gefunden worden, daß in der Natur außer der erwähnten *Uranreihe* 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, auch schwache Radioaktivität aufweisen. Es war aber niemals gelungen, künstlich Kernreaktionen zu erzwingen, d. h. die Zusammensetzung eines sonst als stabil bekannten 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 in Abschnitt V 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 aber eben die in radioaktiven Reaktionen emittierten Teilchen, insbesondere die Alphateilchen. Rutherford ging also daran, stabile Atomkerne, z. B. den Atomkern des Stickstoffs ${}^{14}_7\text{N}$, mit Alphateilchen zu beschießen. Er

beobachtete nun, daß in gewissen seltenen Fällen Stickstoffkerne durch die auftreffenden Alphateilchen zerstört wurden. Die dabei erfolgende Reaktion war:



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*, die *Betatrone* und die *Synchrotrone*, die heute an vielen Stellen der Welt gleichsam aus dem Boden schießen.

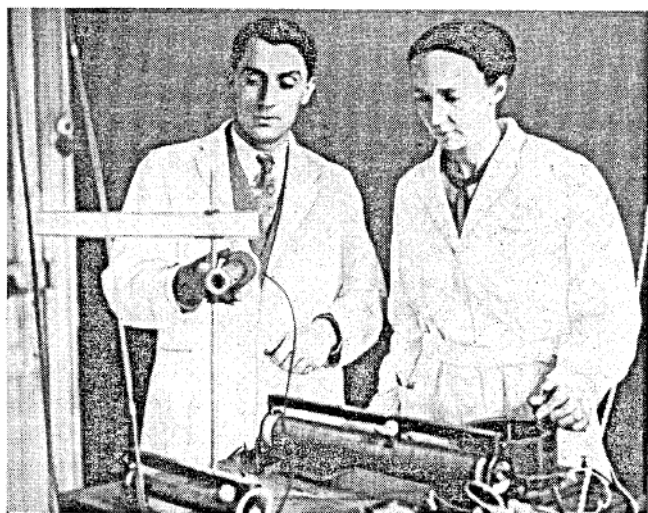
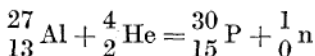


Abb. 17

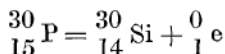
Das Ehepaar Frédéric und Irène Joliot-Curie in seinem
Laboratorium (1935)

Mit ihrer Hilfe sind geladenen Atomen Energien verliehen worden, die die Energien der schnellsten Alphateilchen aus Radioelementen um das Hundertfache übertreffen. So kann man die kompliziertesten und interessantesten Atomkernreaktionen erzwingen.

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 Atomphysiker Frédéric Joliot und seiner Frau Irène Curie (*Abb. 17*), 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

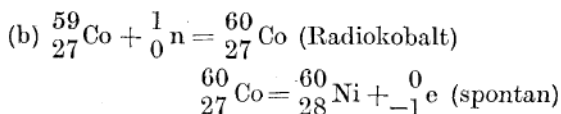
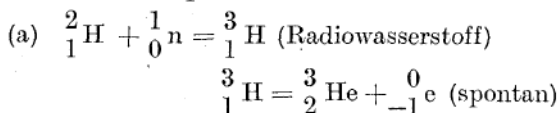
(negatives) Elektron sich mit diesem neutralisieren und verschwinden; ihre Energie, ja sogar ihre Masse (siehe Abschnitt VI, 3), wird dabei in Form von *Lichtenergie* emittiert!

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 ungefähr 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 Geschloß 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 Geschloß elektrisch abstößt. Das Geschloß kann also nur dann in den Kern eindringen, wenn es von vornherein eine gewaltige Energie mitbringt, also sehr schnell bewegt ist. Es muß also eindringen, noch ehe es einen zu großen Teil der Energie, die es im spontanen radioaktiven Atomzerfall oder in einer Maschine (Zyklotron) erhalten hat, verloren hat. 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 kos-

mischer Höhenstrahlung auf Atomkerne, werden sie schon wieder irgendwo anders eingefangen. Die Neutronen müssen daher für jede Anwendung eigens erzeugt, d. h. aus Kernen losgelöst werden. Die mächtigste Anlage zur Erzeugung von Neutronen werden wir in Abschnitt VII kennenlernen.

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



Die Halbwertszeiten der betaaktiven Produkte betragen 11 Jahre für Radiowasserstoff (a) bzw. 5·3 Jahre für Radiokobalt (b). Der *Radiowasserstoff* (Tritium oder Triterium ${}_1^3\text{H}$) gesellt sich also zu den beiden stabilen Wasserstoffisotopen (*Abb. 11*, Seite 44).— *Radiokobalt* findet wichtige praktische Anwendung (siehe Abschnitt X, 2).

7. 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 Elementenumwandlung wird als *Transmutation* bezeichnet. 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 Erzeugung 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*: einer neuen — diesmal streng wissenschaftlichen — Alchimie. Die Erzeugung von Gold ist allerdings nicht das Ziel der modernen Alchimisten. Sie erzeugen Stoffe, die weitaus größeren wirklichen Wert als Gold besitzen: radioaktive Stoffe und Rohstoffe für die Atomtechnik.

V. Die Energien der Atomkerne

I. 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 in Abschnitt III (S. 38—41) beschriebenen Reaktionstypen (Kovalenz und Elektrovalenz) vertreten sei. Wir wählen (a) die Bildung eines *Wasserstoffmoleküls* aus zwei Wasserstoffatomen, die unter Betätigung einer 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*. — Sowohl bei chemischen

●..... Proton
 ○..... Neutron
 ●..... Elektron

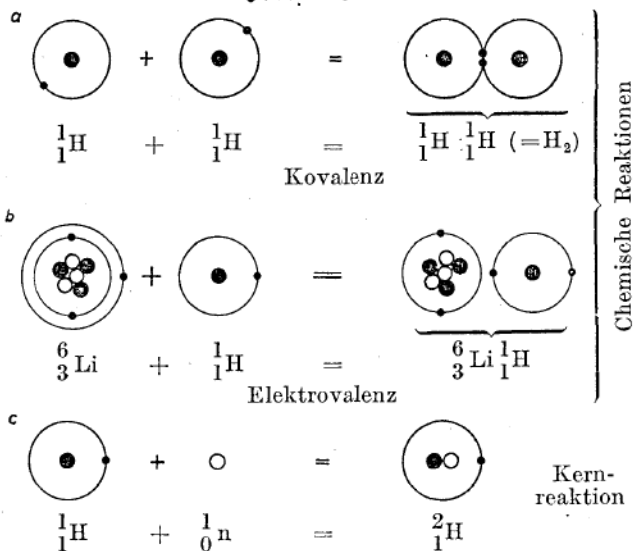


Abb. 18

Analogie zwischen chemischen Reaktionen und Kern-
reaktionen

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 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, b) verbinden (oder trennen) sich lediglich die Elektronen der Atomhülle, bei den Kernreaktionen (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 Energieänderung 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. 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. 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 Arbeits-

tischen der Chemiker gestanden und niemals haben diese auch nur bemerkt, daß mit dem Uran etwas nicht in Ordnung sei. — Auf diesen Einwand ist zu antworten, daß die Dinge in der Vergangenheit deshalb so lagen, weil die natürliche spontane Kernreaktion des *Urans*, also sein Alphazerfall, so *außerordentlich langsam verläuft*. Die Physiker konnten 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 Jahre braucht, ehe es zur Hälfte zerfallen ist (vgl. Abschnitt IV, 3, S. 53). In einem Tag erzeugt 1 kg *Uran* nur 0·00017 Kalorien. Das heißt, der 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 *Radiumkernen*, da ja die Halbwertszeit des Radium 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. Es entwickelt aber sogar 3300 Kalorien, wenn die noch bedeutendere Wärmeentwicklung der radioaktiven Folgeprodukte des Radium mitgezählt wird, die sich im Präparat ansammeln. Da aber noch niemand mehr als einige Gramm Radium besessen hat (siehe Abschnitt V, 2), kann auch diese Wärmequelle nicht viel versprechen.

Beim Alpha- und beim Betazerfall erscheint die entbundene Energie zunächst hauptsächlich als Bewegungsenergie der materiellen Strahlung (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 Zentimeter Dicke oder entsprechend dickere Schirme aus anderem Material verwenden, wenn ein wesentlicher Teil dieser Strahlung absorbiert werden soll.

2. Die im Gleichgewicht vorhandenen Mengen an radioaktiven Stoffen

Um die Möglichkeit einer Nutzbarmachung der Atomkernenergie im spontanen Zerfall radioaktiver Stoffe beurteilen zu können, muß man sich ganz allgemein folgendes überlegen. Das Radium entsteht in der Natur auf dem Wege über verschiedene Zwischensubstanzen aus dem Uran (siehe Abschnitt IV, 3). Betrachten wir nun etwa ein Stück Uranerz, das einige Millionen Jahre ruhig in der Erde gelegen ist. Wir haben in Abschnitt IV, 5, 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 Radium würde daher ständig abnehmen. Im gleichen Maße würde die Anzahl der Zerfälle des Radium 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 Mineralien.

Nun gehen wir einen Schritt weiter. Wir wissen, daß die Stabilität des Radium viel geringer ist als die Stabilität des Urans (siehe Abschnitt IV, 3). 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 Gleichgewichts 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 ihrer mittleren Lebensdauern 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. Jeweils drei Tonnen unnützes Uran, und dazu noch viel totes Gestein, mußten also in den Bergwerken gefördert werden, damit ein Gramm Radium gewonnen werden konnte. Seit 1939 allerdings ist das Uran das Hauptprodukt und das Radium ein schwer absetzbares Nebenprodukt — wenigstens solange die Aktionäre der Bergwerke auf dem überhöhten Radiumpreis von etwa 20 Dollar pro Milligramm bestehen.

Bisher war nur von ungestört ruhendem Gestein (Erz) die Rede. Man begreift aber unschwer, daß die Bedingung des radioaktiven Gleichgewichts 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. Nun wird die Menge Radium, die insgesamt vorhanden ist, nur durch die Konkurrenz der Nachlieferungsgeschwindigkeit, also der Zerfallsgeschwindigkeit des Urans einerseits und der Zerfallsgeschwindigkeit des Radium andererseits, bestimmt. Beide Geschwindigkeiten sind aber von den äußeren Umständen völlig unabhängig (siehe Abschnitt IV, 3). Wir dürfen also schließen, daß *auch in der Erde im ganzen dreimillionenmal mehr Uran als Radium vorhanden ist.*

3. Das Zentralproblem der Atomkernenergie

Es ergibt sich also die mißliche Tatsache, daß gerade von den spontan schnell zerfallenden Radiumelementen wenig vorhanden ist. Die verhältnismäßig starke Wärmeentwicklung des Radium pro Gramm und Tag ebenso wie jene anderer, noch weniger stabiler Radioelemente bringt uns daher keinen Nutzen: Je nützlicher diese

Stoffe wären, desto weniger von ihnen ist vorhanden. Tatsächlich sind unter den Radioelementen nur Uran und Thorium genügend stabil, um überhaupt in nennenswerter Menge auf der Erde vorhanden zu sein. — 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 1909⁴): „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 Radium. 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 Zerfalles eines Elementes 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 in der Wissenschaft, 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 Entdeckung einer künstlichen Kernreaktion (Transmutation; siehe Abschnitt IV, 6).

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!“⁵⁾, 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 erfolgen. Einige Jahre später sollten die ersten Atombomben (so heißen sie bei Wells) von französischen und deutschen Fliegern über Berlin bzw. Paris mit katastrophalen Wirkungen 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 Wells' weniger tieferschürfend waren 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 Abschnitt IV, 6). Damit wurde nun die Nutzbarmachung der Atomenergie, wenn auch näher gebracht, so doch noch nicht unmittelbar ermöglicht. Die Ausbeute bei Kernreaktionen, die mit elektrisch geladenen Geschossen erzwungen werden, ist nämlich sehr klein. Cockcroft und Walton mußten Hunderttausende von Geschossen aufwenden, um einen einzigen Kern zur Reaktion zu bringen. Die anderen Geschosse verloren nutzlos ihre Energie 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 im Abschnitt VI besprochen werden soll.

4. Die Größe der Atomenergie

Bei verschiedenen Kernreaktionen werden, ebenso wie bei verschiedenen chemischen Reaktionen, verschiedene Energiemengen frei. In *Tabelle III* 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 III

Art der Reaktion	Wärmetönung (große Kalorien pro kg Ausgangsstoff)		
Alphazerfall des Urans (s. Seiten 50, 69)	400,000.000	} Kern- reaktionen	
Alphazerfall des Radium ..	490,000.000		
Betazerfall des Tritium ^3_1H (s. Seite 64)	140,000.000		
Betazerfall des Radiophosphor $^{30}_{15}\text{P}$	1.200,000.000		
Betazerfall des Radiokobalt $^{60}_{27}\text{Co}$ (s. Seite 64)	110,000.000		
Einfang von Neutronen durch Protonen	50.000,000.000		
Kerspaltung des Urans mit Folgereaktionen (siehe Abschnitt VI)	19.000,000.000		
Aufbau von Helium aus Wasserstoff	170.000,000.000		
Verbrennung von Steinkohle (s. Seite 68)	8.000		} Chemische Reaktionen (zum Vergleich)
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 gebracht werden kann. Nach den Überlegungen in Abschnitt V, 3, können (wenn wir uns zunächst auf die radioaktiven, also ersichtlich instabilen Elemente beschränken) nur *Uran* oder *Thorium* als Rohstoff dienen.

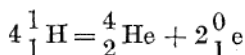
Vergleichen wir nun die durch eine Kernreaktion erhältliche Energie mit dem Energiebedarf Österreichs und der Welt. Wir wollen dabei die *Kernspaltung* zur Grundlage nehmen, obwohl sie erst später besprochen werden soll; tatsächlich ist es ja nur die Kernspaltung, die derzeit verwertet werden kann. Der österreichische Kohlebedarf (gerechnet als Steinkohle von 8000 Kalorien) ist etwa 7 Millionen Tonnen im Jahr. Der jährliche Kohlenkonsum der ganzen Welt beträgt 1500 Millionen Tonnen. Da nun nach *Tabelle III* ein Kilogramm Uran bei Spaltung etwa zweieinhalbmillionenmal mehr Wärme liefert als ein Kilogramm Steinkohle bei Verbrennung, könnten 3 bzw. 600 Tonnen Uran den Kohlebedarf Österreichs bzw. der Welt befriedigen. Dabei wollen wir hier für unsere ganz ungefähre Abschätzung 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 Österreichs und der Welt ist von der Größenordnung 5000 Millionen bzw. 300.000 Millionen Kilowattstunden (kWh). In einem modernen Kraftwerk werden zur Erzeugung einer Kilowattstunde 3500 Kalorien verbraucht. Der Stromverbrauch Österreichs und der Welt kann daher durch Spaltung von zirka 0,9 bzw. 55 Tonnen Uran jährlich gedeckt werden. Da die Dichte des metallischen Urans, bezogen auf Wasser, etwa 19 beträgt, stellen die beiden genannten Uranmengen Würfel von 36 bzw. 140 cm 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 III* zeigt, daß beim explosiven Zerfall eines Kilogramms Uran fünfzehnmillionenmal mehr Wärme als bei der Detonation von einem Kilogramm Dynamit entsteht. Nun darf man freilich die Sprengwirkungen — die überhaupt nicht leicht eindeutig zahlenmäßig zu fassen sind — nicht einfach als allein durch die Wärmeentwicklung gegeben annehmen. Die Wirkung hängt vielmehr von mehreren Faktoren ab. Immerhin erkennen wir die überlegene Wirksamkeit von Atomsprenstoff.

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



Es handelt sich dabei *nicht um einen Abbau* von Atomkernen wie bei den radioaktiven Reaktionen oder bei der Kernspaltung des Urans, sondern um einen *Aufbau* (*Synthese*) eines schwereren Kernes aus mehreren leichteren Kernen. In diesem konkreten Fall ist die *Aufbaureaktion* energieliefernd — und zwar pro Masseneinheit sieben-einhalbmal mehr als die *Uranspaltung*. Auf der Erde hat man bisher noch keinen Weg gefunden, diese Reaktion zu erzwingen. Soweit uns bisher bekannt ist, erfordert sie als ersten Schritt die enge Annäherung zweier (Wasserstoff-)Atomkerne. Da diese aber beide positiv geladen sind, verhindern die elektrischen Abstoßungskräfte eine hinreichende Annäherung. Nur wenn die Temperatur außerordentlich hoch und daher die Bewegungsenergie der Protonen sehr groß ist, ist hinreichende Annäherung möglich. Eine genügend hohe Temperatur wurde auf der Erde (außer vielleicht in einer explodierenden Atombombe) niemals erreicht. Wohl aber existieren entsprechend hohe Temperaturen im Inneren der Fixsterne und auch im Inneren der Sonne. In der Tat besteht

Grund zu der zuerst von Bethe gemachten Annahme, daß die Synthese von Helium aus Wasserstoff die wesentliche Energiequelle der Sonne ist. Bei hoher Temperatur erfolgende Kernaufbaureaktionen dieser Art werden als *thermonukleare Reaktionen* bezeichnet. Wenn einmal ein Mittel gefunden werden sollte, diese Synthese in geregelterm Tempo auch auf der Erde durchzuführen, so stünde in dem Wasserstoff der Weltmeere eine unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung. Die *Wasserstoff- oder Superatombombe* (siehe Abschnitt IX, 4), die freilich noch nicht existiert, soll nach Absicht ihrer Urheber eine thermonukleare Reaktion für Zerstörungszwecke ausnützen.

VI. Die Kernspaltung des Urans

1. Die Kernspaltung als neuartige Kernreaktion

In Abschnitt V, 3, sind wir zu dem Ergebnis gelangt, daß es darauf ankommt, den Zerfall des Urans (oder des Thorium) 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 wieder einmal, daß es der menschlichen Gesellschaft nicht einmal vom Standpunkt des rein praktischen Erfolges aus genügen kann, nur angewandte Forschung mit ganz bestimmter praktischer Zielsetzung zu betreiben. Vielmehr können Forschungen, die ganz „unpraktisch“ erscheinen, jederzeit in überraschender Weise eminente praktische Bedeutung gewinnen. Wer hätte 1896 vermuten können, daß es ein wichtiger Schritt zur Erschließung einer völlig neuen und überwältigend mächtigen Energiequelle sein würde, ein Stückchen Uransalz auf eine Photoplatte zu legen?

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 vorausgesehen. Erst die experimentellen Tatsachen zwangen Hahn und Straßmann

— gegen ihr anfängliches Widerstreben — zu der Annahme, daß eine solche neuartige Kernreaktion stattfindet. Die Kernreaktion besteht darin, daß der Urankern in zwei nahezu gleich große Trümmer gespalten wird. Alle früher bekannten Kernreaktionen hatten nur in der Emission eines oder weniger Elementarteilchen bestanden, z. B. eines Paketes aus zwei Protonen und zwei Neutronen (Alphateilchen); die Masse des Kernes war also durch den Verlust der Alphateilchen nur um einen kleinen Bruchteil (im Fall 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 Urankernes 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 ist die Anlagerungsenergie, die beim Einfang eines Neutrons frei wird, im allgemeinen von der Massenzahl der Kerne fast unabhängig. Dies ist aber nur *eine* Seite der Sache. Andererseits muß man nämlich noch die elektrische Ladung der Protonen berücksichtigen, kraft deren 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, also in den Kernen der höchsten Kernladungszahl, wird sich infolgedessen eine gewisse Tendenz zeigen, elektrische Ladungen „loszuwerden“. Diese Tendenz kann sich bis zu einem gewissen Grade durch eine Bevorzugung von Neutronen in den Atomkernen auswirken. Man kann sich das bildhaft so vorstellen, daß die nur bindend wirkenden Neutronen eine Art Kitt bilden, durch den die Wirkung der Abstoßungskraft zwischen den Protonen auf das erträgliche Maß herabgesetzt wird.

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

Tabelle IV

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 gewisse Menge Neutronen-, „Kitt“ können die Kerne offenbar nicht aufnehmen. Deshalb setzt sich bei den höchstgeladenen Kernen schließlich eine Neigung durch, die positiven Ladungen als solche 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. Die Emission jedes Alphateilchens (Heliumkerns) setzt die Kernladung um 2 Einheiten herab.

Die energetische Basis der Kernspaltung ist mit der des Alphazerfalls 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 noch drastischeres Mittel als der Alphazerfall. — Der *Mechanismus der Spaltung* ist etwa der folgende: Nach dem *Tröpfchenmodell des Atomkernes* sind die Nukleonen in ständiger 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 zwetschkenförmigen 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, freiwillig 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

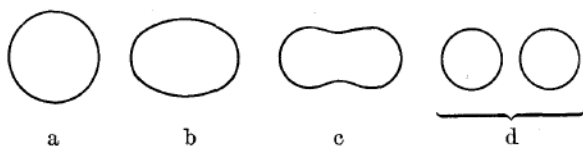


Abb. 19

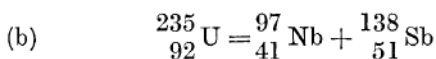
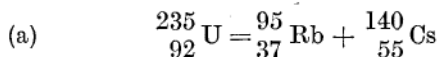
Gestaltveränderung und Spaltung eines Atomkerns von hoher Kernladung

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

den Nukleonen ist nicht die gleiche. Man weiß vielmehr, daß die Kohäsionskräfte mit zunehmendem Abstand schneller als die abstoßenden elektrischen Kräfte abnehmen. Dies führt nun dazu, daß die Ausbildung einer Eigestalt zu einer Katastrophe des Kerns führen kann (Abb. 19). 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 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 überschritten 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. Praktisch darf man freilich hinreichend starke *spontane* Gestaltänderungen (Verzerrungen) nur bei solchen Kernen erwarten, die schon von vornherein durch ihre hohe Ladung stark beansprucht sind. Bei solchen Kernen wird die kritische Verzerrung leicht erreicht. Tatsächlich hat das *Uran* unter allen natürlichen Elementen die höchste Ladungszahl.

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



In Wirklichkeit gibt es mindestens fünfzig verschiedene Arten der Spaltung.

2. 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. Kernspaltung des Urans tritt zwar, wie zuerst 1940 von den jungen Forschern Flerow und Petržak in Moskau gezeigt wurde, auch spontan, d. h. also ohne Beschuß durch Neutronen, ein; doch ist eine solche *spontane Kernspaltung*, 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 Kernspaltungen hervorgerufen können.

Wie leicht die kritische Verzerrung eines Atomkerns erreicht werden kann, hängt von der genauen Zusammensetzung des betreffenden Atomkerns 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 1500 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.

3. Die Wärmetönung der Kernspaltung

Die Entdeckung Hahns und Straßmanns (siehe Abschnitt VI, 1) 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 begreifen, wenn man sich daran erinnert, daß bei der *Kernspaltung* ein viel tiefer gehender Eingriff in das Gefüge des Kerns erfolgt als etwa bei der *Abspaltung* eines Alphateilchens. Bei der Kernspaltung wird die Kernladung in weitaus radikalerer Weise herab-

gesetzt. Diese Konsequenz wurde theoretisch zuerst von zwei Wienern 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 Urans noch um etwa das Vierzigfache übertraf (*Tabelle III*, Seite 76).

Gelegentlich wird die Wärmetönung bei der Kernspaltung darauf „zurückgeführt“, daß Materie in Energie umgewandelt wird. Tatsächlich ist nach Einstein jede Energieabgabe einer gewissen Materieabgabe gleichwertig. (Ein Prinzip, das schon von Lomonossow vorausgeahnt wurde.) Man kann auch leicht den nach Einstein zu erwartenden *Massenverlust* nachweisen, der mit Kernreaktionen, natürlich auch mit der so überaus heftig verlaufenden Kernspaltung, verknüpft ist. Es hat aber keinen Zweck, die Sache so darzustellen, als wäre der Massenverlust die „Ursache“ der Energieabgabe. Auch darf man sich diese 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 die wesentliche Ursache für die *Nichtganzzahligkeit der Atomgewichte* auch von Reinelementen, was in Abschnitt IV, 2, erläutert wurde. Nukleonen haben eben je nach ihrem Bindungszustand ein (wenig) verschiedenes Gewicht.

4. Die Neutronenemission bei der Kernspaltung; Gedanke der Kettenreaktion

Die nächste Konsequenz wurde — ebenfalls noch im ersten Sechstel des Jahres 1939 — von Frédéric Joliot und seinen Mitarbeitern Hans Halban (einem Wiener) und Lew Kowarski in Paris gezogen. Die Pariser Forscher gingen davon aus, daß im Sinne der *Tabelle IV* (Seite 82) bei einer Spaltung des Uran-kerns 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. Streng¹ 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 wohl bekannt war, nur 64. Was geschieht also mit den überschüssigen 16 Neutronen? Man konnte nun daran denken, daß sie sich durch den wohlbekannteren Betazerfall 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. Ein solcher Prozeß war zwar vorher an keinem Kern beobachtet worden, aber man hatte ja auch niemals zuvor Kerne mit derartigen Neutronenüberschuß kennengelernt.

Joliot und seinen Freunden 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. Andererseits werden bei der Spaltung wieder Neutronen freigemacht. Man begann also den Gedanken einer „Kettenreaktion“ zu diskutieren. 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. 20*).

Sich selbst fortplanzende 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 materiellen Teilchen gebildet, die die zur Zündung erforderliche Energie weitertragen. Explosionen 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 dadurch zu entfesseln, daß 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 ver-

wandte Reaktion handelt, ist praktisch von beschränktem Interesse. Allerdings wird die Energielieferung, wie oben erwähnt wurde und wie auch ein Blick auf die

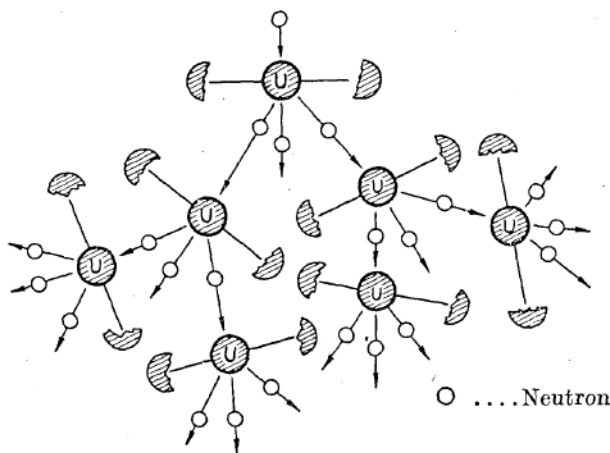


Abb. 20

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.

Tabelle III (Seite 76) zeigt, durch den Übergang vom Alphazerfall zur Kernspaltung um das Vierzigfache gesteigert. Die Geschwindigkeit des Zerfalls wird aber in

einem sehr viel größeren Verhältnis gesteigert. 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 20.000 Kalorien pro Kilogramm und Tag und die Anwendung zur Erzielung von Sprengwirkungen sogar 100 Millionen Kalorien pro Kilogramm und Millionstelssekunde liefern. Diese Schätzungen seien hier ohne weiteren Beweis mitgeteilt.

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

5. 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 Neutronenanzahl in jeder „Generation“ kleiner als in der vorangegangenen Generation und die Kette stirbt alsbald ab; eine solche Kette wird als *konvergent* bezeichnet. Tatsächlich dürften durchschnittlich etwa $2\frac{1}{3}$ Neutronen pro Spaltung freigesetzt werden⁶⁾.

Die Grundforderung für die Aufrechterhaltung der Reaktionskette ist also erfüllt. Aber auch ein gewisser *Verlust* von Neutronen ist nicht zu vermeiden. Neutronen können nämlich noch auf andere Weise als durch Einfang in Uran mit nachfolgender „Spaltung“ sterben. Sie kommen dann also nicht zur Wirkung. Auch diese Verluste müssen berücksichtigt werden. Eine Kette 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 solche Kette — 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 räumlichen Anordnung des Urans, vom Reinheitsgrad der verwendeten Werkstoffe (einschließlich des Urans) usw. abhängen. Es ist 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. 21*).

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 Abschnitt war bisher nur davon die Rede, daß Neutronen Kernspaltungen 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 Abschnitt VI, 2). Die eine der beiden Uransorten enthält neben den 92 Protonen im Kern noch 143, die andere dagegen noch 146 Neutronen. Das schwerere

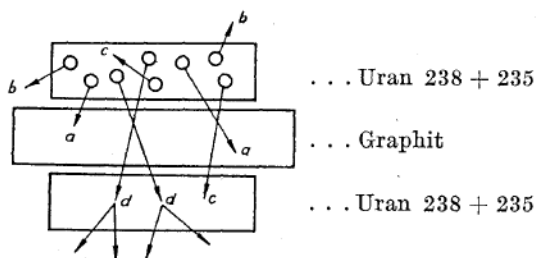


Abb. 21

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

- | | | |
|-----------------------------|---|--|
| Verlust
der
Neutronen | { | 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 —→ Fortsetzung der Reaktionskette. |

Isotop U 238 ist 140mal häufiger als das leichtere U 235, unterliegt aber der Spaltung nicht so leicht wie dieses (siehe Abschnitt VI, 2). Es kann nur durch Beschießung mit 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 in Abschnitt VII 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 Urans 238 für die Aufrechterhaltung der Reaktionskette ungünstig, eine Reaktion mit dem Kern des Urans 235 günstig. Und jetzt kommt ein wichtiger Punkt: Das Verhältnis der Reaktionswahrscheinlichkeiten mit U 235 und mit U 238 ist in den beiden Energiebereichen nicht gleich. Das Verhältnis ist bei Verwendung langsamer Neutronen günstiger.

Die Verbesserung dieses Verhältnisses ist entscheidend. 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 erzielen⁷⁾. Bei Verwendung natürlichen Urans müssen die Neutronen daher unbedingt verlangsamt werden.

6. 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 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).

Das Zustandekommen einer divergenten Kette erfordert also außer dem 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 Grund kann Wasserstoff, der sonst der wirksamste und billigste Moderator ist, in einem Reaktor nicht verwendet werden. Wasserstoff schluckt nämlich ziemlich gierig Neutronen. Somit bleiben uns 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 daher sehr teuer. Man braucht für einen Reaktor immerhin mehrere Tonnen Schweres Wasser. (Vor dem zweiten Weltkrieg wurde dieser Stoff nach Kubikzentimetern gemessen.) — Graphit ist trotz der notwendigen extremen Reinheit, die nur bei Material gewährleistet ist, das aus Petroleumkoks 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. Schweres Wasser wird, soweit bekannt, nur in drei Reaktoren (einer in Argonne bei Chicago, zwei in Chalk River, Kanada) als Moderator verwendet.

7. 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 Halban und Kowarski im Dezember 1940 in Cambridge nachgewiesen. Halban und Kowarski waren die beiden Mitarbeiter Joliot's, die an der Entdeckung der Neutronenemission bei der Kernspaltung beteiligt gewesen waren. Als Frankreich 1940 zusammenbrach, entsandte Joliot seine beiden Freunde 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 Organisierung des nationalen Widerstandskampfes führend Anteil zu nehmen. Halban und Kowarski zeigten dann, 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 1940 in Cambridge tatsächlich schon eine Kettenreaktion in Gang war. Wir haben bisher einen Faktor außer acht gelassen, der sehr wichtig ist, wenn das 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 in Abschnitt VI, 5, 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_{∞} . Der tatsächliche Reproduktionsfaktor in dem System beschränkter Größe wird als k (ohne Index) bezeichnet. Wenn k_{∞} zwar größer als 1 ist, 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 derer 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 Oberfläche des kritischen Volumens wird bei Kugelgestalt des Reaktors am kleinsten, also am günstigsten sein. Halban und Kowarski besaßen 1940 nicht genug Schweres Wasser, um die kritische Größe des Systems zu erreichen. Immerhin konnten sie nachweisen, daß für jedes Neutron der ersten Generation, das nicht durch die Oberfläche abwandert, in der zweiten Generation mehr als ein Neutron entsteht. 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 an sich geeignet war. — Die erste tatsächlich divergente Kette lief erst im Dezember 1942 in Chicago unter Leitung des emigrierten italienischen Physikers Fermi an. Die kritische Größe wurde 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 $k_{\infty} = 1.07$ angegeben⁷⁾.

Aus Gründen der Materialersparnis will man das kritische Volumen 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 *Strahlenschutzmantels* (Abb. 22).

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 regel-

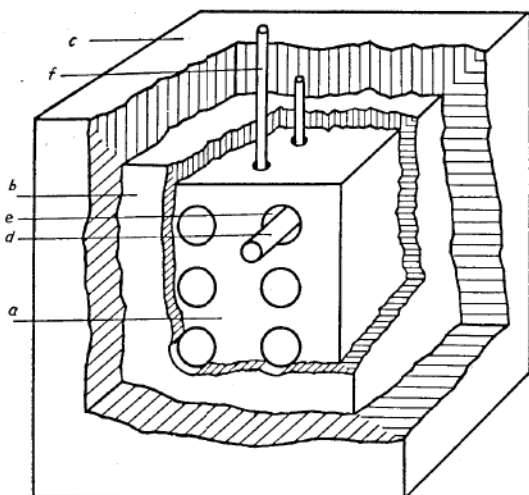


Abb. 22

Schematische Anordnung der wichtigsten Teile eines Reaktors (Uranbatterie, 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.

mäßigen 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 sollen aber daran gehindert werden, auf das Uran einzuwirken, ehe sie verlangsamt sind; 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 gebaut.*

VII. Der Aufbau von Reaktoren

1. 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 wohl unmöglich ist, auf ersten Anhub eine Großanlage zu errichten. Vielmehr wird man stets zuerst 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 (Anfang 1950) befindet sich Frankreich im ersten Stadium, Großbritannien und Kanada liegen im zweiten Stadium und die Vereinigten Staaten und die UdSSR haben das dritte Stadium erreicht. Kein anderes Land besitzt überhaupt einen Reaktor. Allen gegenteiligen Behauptungen zum Trotz hat Deutschland niemals einen Reaktor besessen.

2. Reaktoren der Stufe I (energielose Reaktoren)

Die Kleinreaktoren, also Reaktoren der Art des 1942 in Chicago angelaufenen Reaktors, werden auch als *energielose* Anlagen bezeichnet. Die Energie, die sie ent-

wickeln, ist nämlich noch sehr gering. Der Chicagoer Reaktor lief zunächst mit einer Leistung von $\frac{1}{2}$ Watt, später mit 200 Watt Leistung⁷⁾. Die Energie hätte also, wenn man sie überhaupt hätte verwenden können oder wollen, nur zum Betrieb einer besseren Glühlampe gereicht. Daher ist beim Kleinreaktor auch keine Kühlung nötig. Trotzdem war die erzeugte Strahlungsmenge nicht so unerheblich. Man kann berechnen, daß für jedes Watt 30 Milliarden Urankerne pro Sekunde zerfallen müssen. Damit die gleiche Anzahl von Radiumkernen spontan zerfalle, muß man schon eine Menge von einem Gramm heranziehen. Immerhin wird der größte Teil der Strahlung im Inneren des massiven Reaktors, der viele Tonnen wiegt, absorbiert. Daher ist auch ein recht primitiver Strahlenschutz hinreichend, der aus einer Betonmauer besteht.

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, die Neutronendichte konstant halten, 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 doch erst nach dem Eintreffen der „Nachzügler“ eine nennenswerte Steigerung der Neutronendichte eintreten.

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 nicht-metallisches 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 zugelassenes Niveau 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. Praktisch ist das wohl niemals nötig. Übrigens sind wenigstens bei energie-losen 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 aus dem Reaktor weiter 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 Abschnitt VI, 2). 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 1·01-fache der Neutronenanzahl der zweiten Generation, also im ganzen das $1·01 \times 1·01 = 1·021$ -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 nichts anderes, als daß die *schließlich erreichbare Leistung überhaupt nicht von dem Wert des Reproduktionsfaktors abhängt*, vorausgesetzt, daß dieser größer als 1 ist. Bei kleinerem Reproduktionsfaktor (natürlich aber größer als 1) dauert das Erreichen einer bestimmten vorgegebenen Leistung, mit der man arbeiten will, eben nur länger.

Heißt das nun, daß man mit dem kleinsten und bescheidensten Reaktor tatsächlich jede beliebige Leistung erreichen 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 aber 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.

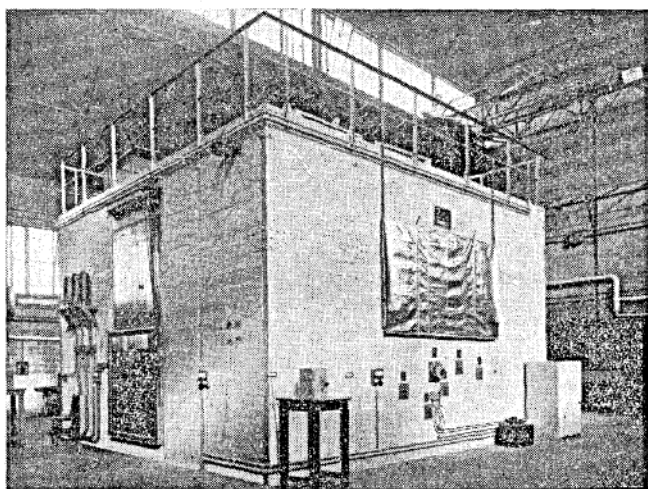


Abb. 23

Reaktor der Stufe I im Fort Châtillon in Paris

(Beschreibung im Text; Aufnahme des Französischen Hochkommissariats für Atomenergie)

Abb. 23 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. energie-los, vgl. Seite 102], O = Oxyd, E = Eau lourde [Schweres Wasser]; der Reaktor arbeitet nämlich mit Uranoxyd

und Schwerem Wasser). Man sieht den würfelförmigen Betonmantel, der den Reaktor umgibt. Die Leistung beträgt etwa 5 kW. Die kamintürchenähnlichen Öffnungen auf 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 Bleipanzer 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.

3. Reaktoren der Stufe II

(Vgl. *Abb. 22*, Seite 100)

Ein Reaktor der mittleren Stufe, der wahrscheinlich noch immer nur einige Dutzend Tonnen wiegt, 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. Wenn das Uran in Blöcken angeordnet ist, ist Kühlung schwierig. Es empfiehlt sich daher, das Uran in Stangenform anzuordnen. Die Stangen können parallel zueinander horizontal oder vertikal die Masse des Graphits (oder des Schweren Wassers) durchziehen, wie die Eisenstäbe den Eisenbeton. Um jede Stange ist ein konzentrischer runder Kanal offengelassen, durch den das Kühlmittel strömt. Als Kühlmittel kommen Flüssigkeiten oder Gase in Betracht. Geeignete Gase sind z. B. Luft, Kohlensäure oder Helium. Geeignete Flüssigkeiten sind Wasser oder gewisse flüssige Metalle, z. B. Natrium oder Wismut. Eine für diesen Verwendungszweck charakteristische Anforderung an das Kühlmittel ist, daß es nicht nur in wärmetechnischer und in chemischer Beziehung befriedigen muß, sondern auch Neutronen nicht in allzu hohem Maße absorbieren darf. Chemisch

soll das Kühlmittel möglichst träge sein, damit es auch bei höherer Temperatur das Metall nicht angreift. Freilich muß man das Uran, das chemisch sehr reaktionsfähig ist, auf jeden Fall durch Überziehen mit einer Haut aus Aluminium schützen. Die Herstellung dieser Überzüge war eines der schwierigeren Probleme der praktischen Atomtechnik. Auch der Strahlungsschutz muß bei den Reaktoren der Stufe II schon sehr ernst genommen werden. Die Anzahl der Urankernzerfälle pro 1000 kW Leistung entspricht etwa der Anzahl der spontanen Kernzerfälle in 1000 Kilogramm Radium. Der Reaktor von Oak Ridge (bei Clinton) im Tennesseeetal liefert mehr als 1800 kW⁷⁾, der größere der beiden Reaktoren in Harwell (England), bekannt als „Bepo“, 6000 kW⁸⁾. Beide Reaktoren verwenden Graphit als Moderator. Dagegen verwenden ein Reaktor von 300 kW in Chicago⁷⁾ und ein größerer Reaktor⁹⁾ in Chalk River (Kanada) Schweres Wasser.

4. 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 Seite 63). Wenn man daher geeignete Stoffe in eigens dafür angebrachte Höhlungen 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.

Die durch *Neutroneneinfang* oder durch *Kernspaltung* erzeugten *Radioelemente* finden zu Forschungszwecken ausgedehnte Verwendung. In Reaktoren der Stufe II können viel größere Mengen an Radioelementen als im Laboratorium hergestellt werden.

5. Reaktoren der Stufe III

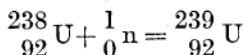
Die Reaktoren der dritten Stufe, also der Endstufe, stellen regelrechte Fabriken dar. Wie weiter unten erklärt werden soll, können sie im Prinzip entweder der Erzeugung nützlicher Energie oder aber der Produktion von Explosivstoffen dienen. Die Leistung eines Reaktors mag mehrere hunderttausend Kilowatt betragen. Zum Vergleich: Das größte Kraftwerk Österreichs, Kaprun, soll nach Fertigstellung der jetzt im Bau befindlichen Ausbaustufe eine Leistung von 200.000 kW haben. Die gesamte Leistung der Elektrizitätsindustrie Österreichs beträgt etwa 1,500.000 kW.

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. Das aufgelöste Uran muß natürlich wiedergewonnen, wieder in Metall umgewandelt und schließlich in den Reaktor zurückgeführt werden. 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 in Wannen durch Fernsteuerung. Das Verfahren steht in der Geschichte der Technologie ohne Beispiel da. Die von spaltbarer Substanz befreiten

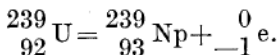
hoch radioaktiven Lösungen, die übrigbleiben und die Spaltprodukte enthalten, werden verworfen. Eventuell läßt man diese Lösungen aber noch eine Zeitlang in einer Art von Klärteichen stehen, bevor man sie in Flüsse oder ins Meer ableitet, damit die Aktivität inzwischen einigermaßen abklingen kann. Es 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.

6. Die Entstehung von Plutonium

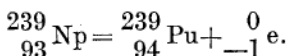
In Abschnitt VII, 1, wurde erwähnt, daß in den Reaktoren der Stufe III Wärme und Sprengstoff erzeugt werden können. Um dies zu verstehen, tragen wir nun Überlegungen über das Schicksal der zahlreichen langsamen Neutronen nach, die vom Uran 238 eingefangen werden. Sie verursachen zumeist keine Kernspaltung. 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 Uran 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 *Nep-tunium* (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 nach seiner Entdeckung Ende des 18. Jahrhunderts nach dem damals neuentdeckten Planeten Uranus benannt worden. — In den letzten Jahren wurden auch schon die Elemente 95 und 96 synthetisch dargestellt, doch haben sie noch keine praktische Bedeutung gefunden. Auch gibt es keine äußeren Planeten mehr, nach denen man sie benennen könnte. Sie erhielten die Namen *Americium* und *Curium*. Die Elemente 93 bis 96 sind übrigens dem Uran recht ähnlich; sie alle sind leicht oxydierbare Schwermetalle. Da sie in der Reihe der Elemente 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 extrahiert werden, ohne daß es während der Prozedur in merklichem Ausmaß zerfallen würde. Die chemische Abtrennung von Plutonium, die z. B. durch selektive Fällung der Fluoride erfolgen kann, wird praktisch in großem Maßstab betrieben. Der Grund hierfür ist der, daß das *Plutonium als Explosivstoff für Atombomben von größtem Interesse* ist. Man kann das Plutonium gleichzeitig mit den kettenvergiftenden Spaltprodukten vom Uran durch Umlösen abtrennen. Allerdings muß man bei der Arbeit mit Plutonium sehr vorsichtig sein. Das Plutonium ist, ähnlich wie das Radium, sehr giftig. Es besitzt nämlich wegen seiner im Vergleich mit Uran ziemlich kurzen Lebensdauer einerseits hohe Radioaktivität und andererseits lagert es sich im Körper nahe dem sehr strahlungsempfindlichen Knochenmark ab. Der Grund für die Brauchbarkeit des Plu-

toniums als Explosivstoff liegt darin, daß es, ebenso wie das seltene Uranisotop Uran 235, besonders leicht spaltbar ist. Es ist viel leichter spaltbar als Uran 238.

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 extrahiert werden, während das Uran 235 chemisch vom Uran 238 nicht getrennt werden kann. Darum hat Plutonium so große Bedeutung für die Erzeugung von Atombomben. Darüber mehr in Abschnitt IX.

7. Die Züchtung von Spaltstoff

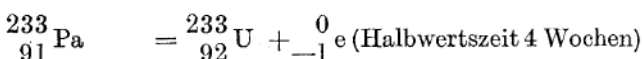
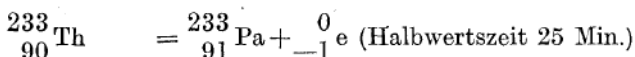
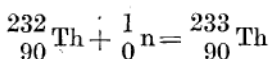
Hier beginnt nun klar zu werden, warum die Gewinnung nutzbarer Energie einerseits und die Erzeugung von Bomben andererseits miteinander unverträgliche Zielsetzungen sind. Während des Ablaufes der Kettenreaktion wird ja ständig Uran 235 verbraucht, das zu Beginn allein die Kette aufrechterhält. Wenn man nun das Plutonium im Reaktor beläßt, so wirkt es in dem Maße seiner Entstehung an der Aufrechterhaltung der Kette mit, da es ebenso, wie Uran 235, schon durch langsame Neutronen spaltbar ist. Ob an Stelle eines jeden verbrauchten Uran-235-Atoms genau ein Atom Plutonium entsteht oder vielleicht weniger oder mehr, ist freilich von vornherein nicht bekannt, sondern muß durch Experimente ermittelt werden. Die Ergebnisse solcher Experimente, die gewiß angestellt wurden, sind nicht bekannt. Aber man weiß aus den Daten, die noch vor Ausbruch des zweiten Weltkrieges und damit vor Beginn der Geheimhaltung gesammelt wurden, daß jedenfalls nicht *viel* weniger Plutonium neu gebildet wird, als Uran 235 verbraucht wird. Falls mehr gebildet

werden sollte, macht man beim Betrieb des Reaktors ein „gutes Geschäft“. Das Plutonium, das derart allmählich die Rolle des Uran 235 übernimmt, bildet, während es gespalten wird, weiteres Plutonium usw. *Vorausgesetzt also, daß alles Plutonium im Reaktor verbleibt, wird allmählich das ganze Uran 238 in Plutonium umgesetzt und dann als solches gespalten.* Aber sogar wenn etwas weniger Plutonium gebildet werden sollte, als Uran 235 verbraucht wird, wenn also das Uran 235 nicht völlig ersetzt wird, kann noch immer ein sehr großer Teil des Uran 238 nutzbar gemacht werden. Nehmen wir z. B. an, der Ersatz finde nur zu 95 % statt! Dann haben wir in der zweiten Generation 95 %, in der dritten Generation noch immer $95 \times 0.95 = \text{ca. } 90 \%$ der ursprünglichen Menge an spaltbarem Material usw. Im ganzen kann unter der Voraussetzung der 95 %igen Reproduktion, wie man mathematisch leicht zeigt, das 20fache der ursprünglich vorhandenen Menge an spaltbarem Material erzeugt und damit auch wieder selbst gespalten werden.

Der (wohlbegründete) Optimismus in bezug auf die Ersetzbarkeit von Uran 235 durch Plutonium, das sich während der Kettenreaktion selbsttätig bildet, war es auch, der uns in Abschnitt V, 4, berechtigt hat, bei der Abschätzung der Atomenergie als Energiequelle die *gesamte* Uranmenge und nicht nur die Menge des Uran 235 in Rechnung zu stellen. Die Lage ist somit diese: Im ersten Augenblick, also für die *Auslösung* einer Kettenreaktion, kommt nur das *Uran 235* in Betracht. Seine Menge bestimmt, ob der Reproduktionsfaktor größer als 1 ist. Sobald aber die Reaktionskette überhaupt in Gang gekommen ist, dient auch das *Uran 238* auf dem Weg über Plutonium als *Spaltstoff*; man „züchtet“ also im Laufe der Kettenreaktion automatisch neuen Spaltstoff.

Man kann aber außer dem Spaltstoff, den man auf diese Weise im Uran selbst züchtet, noch weiteren Spaltstoff züchten, indem man den Reaktor mit dem sonst

für Atomenergiezwecke nutzlosen *Thorium* umgibt. Thorium selbst ist, ähnlich wie Uran 238, nur schwer spaltbar. 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 kann nun ebenso wie Plutonium entweder zur Belegung eines Reaktors oder als Explosivstoff verwendet werden.

8. Nutzbare Wärme oder Sprengstoff?

Der Plan, das sich aufbrauchende Uran 235 durch das sich bildende 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, im Gegenteil, 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. Von einer gänzlichen Verwertung des Urans ist also 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 damit alle Rentabilitätsberechnungen usw. sich 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 — auch wenn 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. Es würde also zur Nutzbarmachung der bei der Plutoniumerzeugung anfallenden Wärme nicht genügen, das Kühlmittel (Wasser) im Reaktor zum Sieden zu erhitzen und es bei 100°C in eine Wärmekraftmaschine (Dampfturbine) zu leiten. Voraussetzung wäre vielmehr, daß das Kühlmittel bis auf einige hundert Grad erhitzt würde, d. h. daß der Reaktor bei hohen Temperaturen in Betrieb stünde. Nun ist aber der Betrieb eines Reak-

tors bei hohen Temperaturen viel schwieriger als bei niederen Temperaturen. Vor allem müssen die Werkstoffe viel sorgfältiger vor Korrosion (die besonders durch das Kühlmittel bewirkt werden kann) 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 derartige 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 verwertet wird. In Abschnitt VIII wird die Berechtigung der Annahme dargelegt werden, daß ein solches Atomkraftwerk wirtschaftlich arbeiten werde. Die Anlage lohnt sich aber gewiß nicht, wenn das Uran schon verworfen werden soll, sobald nur ein sehr kleiner Bruchteil davon gespalten ist, also sobald eine möglichst große Menge Plutonium erzeugt und extrahiert 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 niederer 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 man wird vor allem einen möglichst raschen Strom von Kühlmittel rücksichtslos durch die Kühlkanäle jagen.

Tatsächlich ist die einzige Plutoniumfabrik der Welt, über die Angaben veröffentlicht sind, nicht auf die

Verwertung der abfallenden Wärme eingerichtet. Es handelt sich um die 1944 errichtete, aus drei gesonderten Reaktoren bestehende Anlage in Hanford im Staate Washington in der Nordwestecke der USA. Parallel mit einer Wärmeezeugung von je 12.000 bis 36.000 kWh erfolgt die Bildung eines Gramms Plutonium⁷). Das Kühlwasser wird dem Columbiafluß entnommen, der sich durch die Reinheit seines Wassers auszeichnet. Man berechnet leicht, daß für je 100.000 kW und Stunde 1800 Hektoliter Kühlwasser bis zum Sieden erhitzt werden müssen. Diese gewaltige Wärmemenge „dient“ der Erwärmung des Flusses. Offenbar ist es absolut unzweckmäßig, die Plutoniumerzeugung mit der Energieerzeugung zu koppeln. Auch die anderen Reaktoren, über die Daten bekannt sind, also die (kleineren) Reaktoren der Stufe II, vergeuden die entstehende Wärme. Eine höchst bescheidene Ausnahme macht der in Abschnitt VII, 3, erwähnte Reaktor der Stufe II in Harwell (England), bei dem die Abwärme zur Raumheizung in Laboratorien und Arbeiterhäusern verwendet werden soll — keine eindrucksvolle Anwendung der Atomenergie! Die Praxis bestätigt also durchaus, daß man sich bei dem Bau eines Werkes der Stufe III 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.

In einem der Energieproduktion dienenden Reaktor darf übrigens der Wärmeträger (also das erhitzte Kühlmittel) nicht direkt in eine Wärmekraftmaschine eingeführt werden. Das Kühlmittel wird nämlich unvermeidlich stark radioaktiv und würde einen Teil der Aktivität auf die sich bewegenden Maschinenteile übertragen. Instandhaltung der Maschinen wäre dann wegen Gefährdung des Personals unmöglich. Man muß also zuerst die Wärme in einem Austauschere auf einen zweiten Wärmeträger übertragen. Dieser treibt dann die Maschine.

9. Warum hatte Deutschland keinen Reaktor?

Nach dem Abwurf der ersten Atombombe auf die unselige Stadt Hiroshima verbreiteten die Unentwegten 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 Bomben 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 nicht mehr.

Diese auffallende Tatsache wird von Thirring in seinem Buch „Die Geschichte der Atombombe“¹⁴⁾ 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.

Die These Thirrings findet ihre konkrete Bestätigung in dem sensationellen Buch „ALSOS“ des hervorragenden holländischen Physikers Samuel Goudsmit. Dieses Buch 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. Es ist vollkommen unrichtig, daß die Deutschen „beinahe das Rennen um die Atombombe gewonnen hätten“.

Alsos war der Deckname von Goudsmits Arbeitsgruppe. Nach der Eroberung französischer und deutscher Universitätsstädte verhörte Goudsmit die dortigen Wissenschaftler, um die deutschen Atomenergiegeheimnisse aufzudecken.

Zu Beginn tappte Alsos 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 Nachrichtestückwerk stets in pessimistischem Sinn interpretiert. Zum Beispiel entdeckte Alsos, 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 Thoriumsüher 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, d. h. sie war nicht bis zu dem in Chikago am 2. Dezember 1942 erreichten Punkt vorgedrungen. Ähnlich stand es theoretisch: Der Gedanke, Plutonium,

D. D. A. G. R.
Kultur & Geschäftsvertr.

Geheim

9.
8. Juli 1943

He

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

B e r l i n W 8
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 s a u über den gegenwärtigen Stand der Arbeiten mit der Bitte, dem Herrn Reichsmarschall darüber vorzutragen 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

gez. Menzel

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 vorgeschlagen 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. Die Reaktion in einem *Reaktor* basiert nämlich auf *langsamen Neutronen* und verläuft viel zu langsam (siehe Abschnitt IX, 1). Eine *Bombe* muß mit *schnellen Neutronen* arbeiten, und diese wirken (abgesehen von dem nur durch Isotopentrennung rein herstellbaren Uran 235) hinreichend stark nur auf Plutonium. Gerade Plutonium wurde aber ignoriert.

Erstaunlich waren 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.

VIII. Die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie

I. Sind die Rohstofflager hinreichend?

Gelegentlich wird in Zweifel gezogen, ob es genug Uran auf der Erdoberfläche gibt, damit der Energiebedarf der Menschheit durch Spaltung von Uran gedeckt werden könne. Diese Besorgnis ist unbegründet. Uran ist zwar keines der häufigsten, aber auch keines der seltensten Elemente. Nach den Daten der Geochemiker Vernadsky, V. M. Goldschmidt usw. beträgt der mittlere Anteil des Urans an der Erdkruste einige Gramm pro Tonne. Danach wären in den obersten fünf Kilometern der Erdkruste 50,000.000.000.000 ($=5 \times 10^{13}$) Tonnen Uran enthalten. 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 1948 1,300.000 Tonnen. Dabei ist Blei nur sechsmal häufiger als Uran und zweimal häufiger als Thorium in der Erdkruste vertreten. Zur Deckung z. B. des gegenwärtigen Weltbedarfes an elektrischer Energie würden aber schon 55 Tonnen Uran jährlich genügen (siehe Seite 77). Rohstoffmangel würde also die Umstellung auf Atomenergie nicht bedrohen.

Nun könnte weiter eingewendet werden, daß uns mit Uran nicht ohne weiteres gedient ist, wenn es in Gesteinen fein verteilt ist. Zur bergmännischen Gewinnung zieht man Erze vor, in denen das Uran einiger-

maßen konzentriert ist. Tatsächlich sind Erze, die Uran als einen Hauptbestandteil enthalten, also Erze von der Art der berühmten Joachimsthaler Uranpechblende, verhältnismäßig selten. Dieser Einwand braucht aber auch nicht allzu ernst genommen zu werden. Erstens werden bei Nachforschungen gewiß weitere reiche Uranerzlager gefunden werden. Zweitens begünstigen die ganz charakteristischen chemischen Eigenschaften des Urans seine Abtrennung vom tauben Gestein. Drittens können die Kosten der Urangewinnung jedenfalls auch bei Aufarbeitung uranarmen Erzes nur einen kleinen Teil des Wertes der gewonnenen Atomenergie betragen, da ja der Energiegehalt je Gewichtseinheit Uran sehr groß ist. Dies sei durch ein Beispiel illustriert. Die Vereinigten Staaten sind besonders arm an Uranerz. Andererseits bemüht sich die Regierung aus naheliegenden Gründen außerordentlich um die Erschließung der dortigen armen 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 nur auf 8 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 gleichen 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.

In *Tabelle V* sind die Urangehalte einiger Minerale und Gesteine zusammengestellt.

Tabelle V

Mineral	Urangehalt in Gramm pro Tonne
Uranpechblende (Kongo, Kanada, Joachimsthal) ..	300.000 bis 600.000
Carnotit (USA)	20.000 bis 70.000
Autunit (Portugal)	20.000 bis 30.000
Kolm (schwedischer Ölschiefer)	250
Granit	4

Der sehr kleine Urangehalt des Granits, des vorherrschenden Gesteins unserer Uralpen, verleiht diesem Gestein noch immer einen Energieinhalt, der den Energieinhalt einer gleich großen Menge Steinkohle übertrifft. — Ausgedehnte Thoriumlagerstätten liegen in Form des Monazitsandes an den Küsten Brasiliens und Indiens. Der Monazit ist so häufig, daß er früher als Schiffballast verwendet wurde. Er ist auch der Rohstoff für die Erzeugung von Gasglühstrümpfen in Treibach (Kärnten), die von Carl Auer-Welsbach begründet wurde.

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 der Schlacke, die obenauf schwamm und sich bei der Abkühlung des Erdballs verfestigte. Derart sind Uran und Thorium zum allergrößten Teil in der Erdkruste verblieben. Zu der Annahme eines uranarmen Erdkerns muß man aber auch noch aus einem anderen Grunde gelangen. Wenn nämlich der Uran- und der Thoriumgehalt des Erdinneren jenem der Erdkruste nahekäme, müßte die Erde viel mehr aus radioaktiven Prozessen stammende Wärmeenergie entwickeln, als dies

tatsächlich der Fall ist. Die Erde müßte also immer heißer werden. Das trifft offenbar nicht zu. Folglich muß der Erdkern arm an radioaktiven Stoffen sein. Schließlich zeigen auch die chemischen Analysen der aus *Eisen* bestehenden Meteoriten, daß sie *wenig* Uran und Thorium enthalten. Die Eisenmeteoriten sind aber wahrscheinlich Bruchstücke des Kerns eines zersprengten Planeten.

2. Die Wirtschaftlichkeit eines Atomkraftwerkes

Die Atomenergie entstammt einer Energiequelle, deren Beherrschung wir erst vervollkommen müssen. Mit zunehmender Entwicklung der Atomtechnik wird daher auch die Wirtschaftlichkeit der Anlagen verbessert werden können — und zwar in einem rascheren Tempo, als dies in der Zukunft von Kohlenkraftwerken erwartet werden darf. Die letzteren haben ja schon jetzt technisch eine hohe Stufe der Vervollkommnung erreicht. Um so bemerkenswerter ist es, daß nach Berechnungen die Atomkraftwerke schon heute den wirtschaftlichen Konkurrenzkampf mit Kohlenkraftwerken aufnehmen könnten.

Um diese Rechnungen durchführen zu können, muß man gewisse Annahmen machen, zu denen vernünftigerweise die folgenden gehören: (A) Das entstehende Plutonium wird nicht für Bomben abgezweigt, sondern verbleibt im Produktionsprozeß; (B) die Erzeugung von Radioelementen, Bestrahlungen usw. werfen keinen finanziellen Betrag ab.

Als Beispiel einer solchen Berechnung sei in *Tabelle VI* ein Voranschlag angeführt, der von einer Gruppe von Wissenschaftlern an der Universität von Kalifornien unter Leitung von Condliffe ausgearbeitet wurde¹⁰). Der Voranschlag bezieht sich auf ein Großkraftwerk von 500.000 Kilowatt, also ein Werk von der zweieinhalbfachen Größe der ersten Ausbaustufe von Kaprun. Die ermittelten Stromkosten gelten für Größtabnehmer, die ihren Strom unmittelbar den Hochspannungsleitungen

der Kraftwerke entnehmen. Die (sehr hohen) Kosten der Stromverteilung sind also in *Tabelle VI* nicht inbegriffen. Der Kohlepreis ist zu 6 Dollar pro Tonne und der Uranpreis zu 22 Dollar pro Kilogramm angesetzt. Offenbar kostet die Gewinnung des reinen Uranmetalls aus Oxyd 14 Dollar pro Kilogramm (vgl. Seite 123). Die im Original enthaltenen Ziffern für den Preis des Atomstromes, die sich auf einen höheren Ausnutzungsgrad beziehen, sind vorsichtigerweise auf 45% umgerechnet worden.

Tabelle VI

	Vergleichswerte	
	Kohlenkraft	Atomkraft
Leistung (Kilowatt)	100.000	500.000
Fläche (Hektar)	4	4.000
Thermischer Wirkungsgrad (Prozent)	35	40
Angestellte (Zahl)	60	200
Ausnutzungsgrad im Jahres- durchschnitt (Prozent)	45	45
Investition (Millionen Dollar) ..	13·2	68·7
	Betriebskosten (Millionen Dollar)	
	Kohlenkraft	Atomkraft
Brennstoff	1	0·1
Löhne	0·24	0·8
Instandhaltung	0·12	1
Verzinsung, Amortisation	1·98	10·3
insgesamt	3·34	12·2
Kosten der Kilowattstunde (cents).....	0·85	0·62

Die Tabelle zeigt, daß der Anteil von Verzinsung und Amortisation an den Stromkosten (pro kWh) beim Atom-

kraftwerk den entsprechenden Anteil beim Kohlenkraftwerk übertrifft. Andererseits sind die reinen Brennstoffkosten viel geringer. Man wird daher ein Atomkraftwerk jahrein, jahraus mit möglichst hoher Belastung laufen lassen. Die Deckung der Strombedarfsspitzen, wie sie zu gewissen Tagesstunden und Jahreszeiten auftreten, wird vielleicht besser durch zeitweiligen Einsatz von Kraftwerken von anderem Typus erfolgen. Bei 100%iger Ausnützung würde der Atomstrom nur auf 0.35 cents/kWh zu stehen kommen.

3. Kosten der Elektroenergie an verschiedenen Standorten

In *Tabelle VII* sind zum Vergleich die Stromkosten an verschiedenen Stellen der Erde zusammengestellt. Man erkennt, daß in erster Linie diejenigen Gegenden der Erde aus der Atomenergie Nutzen ziehen werden, in

Tabelle VII

Ort des Kraftwerkes	Preis der Kilowattstunde aus modernem 100.000-kW-Kraftwerk bei 50% Ausnützung in Dollarcenten (1 Dollar=21.50 ö. S.)
USA (Kohle, 1947).....	0.57 bis 0.95
Indien (Kohle, 1937)	0.65 bis 1.0
China (Kohle, 1937).....	0.65 bis 0.9
England (Kohle, 1947)	0.95
Argentinien (Kohle, 1947)..	1.6 bis 1.8
Österreich (gültiger Preis) ..	0.3 bis 0.5
Österreich (Wasserkraft-Neuanlage)	0.55 bis 0.75 (nach Angaben österreichischer Fachleute)
Atomenergie in USA	0.62 (Schätzung der Universität von Kalifornien ¹⁰)
Atomenergie in USA.....	1.0 (Schätzung des Thomas-Komitees ¹⁰)

denen es an einheimischen Brennstoffen mangelt, z. B. Südamerika. Der Preis der Atomenergie kann ja auch nur viel weniger von dem Standort des Kraftwerkes abhängen, da keine nennenswerten Brennstofftransporte notwendig sind. Auf lange Sicht wird also die Nutzbarmachung der Atomenergie nicht nur die Energie für die ganze Menschheit verbilligen, sondern auch zu einer gesunden Dezentralisierung der Weltwirtschaft und damit auch des menschlichen Siedlungsgebietes beitragen. Die enorme Konzentration der Besiedlungsdichte an den Produktionsstätten der Kohle, z. B. in England, in Belgien, an der Ruhr und in Pennsylvanien, wird sich überleben.

Zugegebenermaßen ist die mangelhafte Energieversorgung weiter Gebiete der Erde, z. B. Süd- und Ostasiens sowie Südamerikas, nicht allein eine Folge des Mangels an Brennstoffquellen oder an Wasserkraften. In manchen dieser Länder, z. B. in China, gibt es sogar reiche Brennstoffvorräte. Daß sie bisher nur wenig genutzt wurden, hatte politisch-soziale Gründe. Jedenfalls aber wird die Atomenergie es gestatten, die Rückständigkeit dieser Länder in raschem Tempo zu beheben, sobald einmal jene politisch-sozialen Hindernisse überwunden sein werden. Nach Angaben des hervorragenden Physikers Saha stehen z. B. dem Inder von heute im Durchschnitt nur $1\frac{1}{2}\%$ jener Menge an mechanischer Energie zur Verfügung, die der Amerikaner verwendet¹²). In Indien stammen noch 70% der verwendeten Energie aus tierischer oder aus menschlicher Muskelkraft, in Amerika nur 4%. Es ist kaum daran zu zweifeln, daß fortschrittliche Gesellschaftssysteme in rückständigen Ländern die Erzeugung sowohl von Kohlen- und von Wasserkraft als auch von Atomenergie bis zum äußersten anspannen werden.

Was die Stellung der UdSSR zur Frage der baldigen Nutzbarmachung der Atomenergie betrifft, so sei eine Äußerung Molotows vom November 1945 zitiert: „Der Feind hat uns in unserer friedlichen schöpferischen

Arbeit gestört. Doch werden wir alles aufholen, wie es sich gehört, und wir werden es erreichen, daß unser Land in voller Blüte dastehen kann. Wir werden Atomenergie und vieles andere haben.“ Im November 1949 erklärte Wyschinski vor den Vereinten Nationen: „Wir sind dabei, mit Hilfe der Atomenergie Berge zu versetzen, Wüsten fruchtbar zu machen, Dschungel zu durchschneiden und Wohlstand dort zu schaffen, wo seit tausend Jahren keines Menschen Fuß hingekommen ist.“

4. Wird Uran Kohle einfach ersetzen?

In dem Bestreben, die Menschheit den Gefahren der Atomenergie überhaupt nicht auszusetzen, haben konservativ gesinnte Wissenschaftler gelegentlich den Vorschlag einer internationalen Vereinbarung gemacht, Atomenergie auch für friedliche Zwecke nicht zu entwickeln. Sie haben die Ansicht vertreten, daß die Verwertung der Atomenergie der Menschheit gar keinen besonderen Nutzen bringen könne. Sie haben darauf hingewiesen, daß die Kosten der Brennstoffe (Kohle) nur einen kleinen Teil der Nationaleinkommen verschlingen. Sie haben daraus geschlossen, daß sogar bei völligem Entfallen dieser Rohstoffkosten die Nationaleinkommen nicht wesentlich steigen können. Zum Beispiel kosten die in Österreich jährlich verbrauchten 7 Millionen Tonnen Kohle etwa 1500 Millionen S. Das entspricht nur etwa 5% des Nationaleinkommens. Dennoch liegt hier ein Trugschluß vor. Wie ein Kritiker dieser Überlegung hervorgehoben hat, hat ja auch seinerzeit das Automobil nicht einfach die Pferdekutsche ersetzt, sondern dem Transport überhaupt erst neue Möglichkeiten erschlossen. Analog wird auch billige Energie nicht einfach teure Energie ersetzen, sondern dem Energieverbrauch werden neue Anwendungsgebiete erschlossen werden. Zum Beispiel wird es in Österreich möglich werden, die verschiedensten Arbeitsprozesse zu modernisieren, die Holzbringung radikal zu

mechanisieren, von der Koks-Roheisengewinnung zur Elektro-Roheisengewinnung überzugehen usw. Sogar der zur Reduktion des Eisens im Hochofen nötige Kohlenstoff kann vielleicht durch Wasserstoff ersetzt werden, der durch Atomenergie billig elektrolytisch herzustellen wäre. Die Wärme der Reaktoren kann — mit oder ohne Koppelung mit Stromerzeugung — Fernheizanlagen dienen. Energetisch schlechter gestellte Länder werden aber, wie schon betont, noch größeren Nutzen ziehen — z. B. zur Bewässerung von Trockengebieten. Auch die Elektrifizierung von Verkehrsmitteln und die Erzeugung von Leichtmetall sind in solchen Ländern in wirtschaftlicher Weise heute nicht möglich. Blackett¹³⁾ bemerkt ironisch, daß die Menschen der energiearmen Länder den Möglichkeiten der Atomenergie vielleicht weniger gleichgültig gegenüberstehen dürften als amerikanische Akademiker. Könnte das Uran wirklich die Kohle nur ersetzen, so dürften ja rückständige Länder weniger von der Atomenergie erhoffen als fortgeschrittene Länder, die heute schon viel Kohle verbrauchen!

5. Ein weiteres Hindernis der Entfaltung der Atomenergie

In Amerika selbst bilden die Interessen der privaten Kraftwerke ein ernstes Hindernis für die friedliche Entfaltung der Atomkraft. Dieses Hindernis tritt dem zweiten Haupthindernis zur Seite: dem Wunsch, die Atomtechnik auf die Bombenproduktion zu konzentrieren (siehe Abschnitt VII, 7). Die Kraftwerksbesitzer befürchten, daß ihre Anlagen durch die Konkurrenz der Atomenergie entwertet werden könnten. Diese Gefahr wird um so ernster genommen, als damit gerechnet wird, daß der Staat aus militärischen Gründen Eigentümer der Atomkraftwerke bleiben würde. Schon in den dreißiger Jahren bekämpften die Kraftwerksgesellschaften die Absicht Roosevelts, im Tennesseeetale eine Kette staatlicher

Großwasserkraftwerke zu errichten. Der Wunsch nach Verhinderung einer Verstaatlichung der amerikanischen Energiewirtschaft ist seither nicht schwächer geworden.

Nach dem dritten Halbjahresbericht der Atomenergiekommission der USA (1948) kann eine nutzbringende praktische Verwendung der Atomenergie erst nach 8 bis 10 Jahren erwartet werden. Im vierten Halbjahresbericht (1948), in dem die Aussichten der Gewinnung nutzbarer Atomenergie überhaupt mit auffallender Reserve behandelt werden, wird sogar ein Zeitraum von 20 Jahren als derjenige genannt, innerhalb dessen „unter den günstigsten Bedingungen“ ein nennenswerter Teil des gegenwärtigen Energieverbrauchs der Welt durch Atomenergie werde gedeckt werden können.

Selbstverständlich kann die Sorge um eine Entwertung bestehender Kraftwerke nur in einer Gesellschaftsordnung ein Hindernis darstellen, in der Privateigentum an Produktionsmitteln besteht. In einer Planwirtschaft, in der alle Produktionsmittel der Allgemeinheit gehören, wird jeder Staatsbürger durch Verbilligung der Energie ebenso wie durch irgendeinen anderen technischen Fortschritt reicher. Daher kann es in einer solchen Ordnung keinen Widerstand gegen die friedliche Entfaltung der Atomenergie geben.

6. Atomenergie für Fahrzeuge?

Bezeichnenderweise sind in Amerika solche Projekte zur Stromerzeugung aus Uran am weitesten fortgeschritten, die sowohl wirtschaftlich als auch technisch besonders schwierig sind — Projekte zum Antrieb von Fahrzeugen und von Flugzeugen. Offenbar haben Flugzeuge und Schiffe, besonders U-Boote, die praktisch keinen Brennstoffverbrauch und überhaupt keinen Sauerstoffverbrauch aufweisen, bedeutendes militärisches Interesse. Andererseits ist der Bau geeigneter Atommotoren auch besonders schwierig. Die Konstruktion muß sehr

kompakt ausgeführt sein. Das Problem des Strahlenschutzes in dem beschränkten Raum etwa eines Flugzeuges oder eines U-Bootes ist akut. Dennoch arbeiten die Westinghouse Corporation und die Fairchild Aircraft Corporation schon seit Jahren intensiv an der Verwirklichung solcher Atommotoren, während bis heute kein ernsthaftes Projekt für eine festländische Atomkraftzentrale besteht. Im Wettbewerb zwischen Atombombe und Atommotor (siehe Abschnitt VII, 7) siegt in Amerika der letztere nur dort, wo auch er militärische Anwendung finden kann.

Die Strahlenwirkung läßt es auf absehbare Zeit als unmöglich erscheinen, daß Atomkraft Automobile treiben kann. Auf einem Auto lassen sich keine Betonwände unterbringen. Ehe also ein Atommotor für Autos Wirklichkeit werden kann, müssen neue Wege der Nutzbarmachung der Atomenergie gefunden werden. Wohl aber kann die Herstellung der üblichen Treibstoffe für Verbrennungsmotoren mit Hilfe der Atomenergie verbilligt werden, so daß sich die Einführung der Atomenergie auch auf diesem Gebiete der Technik auswirken wird.

IX. Die Atombombe

I. Die Kettenreaktion mit schnellen Neutronen

Ein Reaktor ist keine Atombombe. Selbst wenn man alle Kontrollmechanismen entfernen würde, so daß die Intensität der Kettenreaktion im schnellsten möglichen Tempo anwachsen würde, wäre keine besonders heftige Explosion die Folge. Die Kettenreaktion im *Reaktor* beruht ja auf der Wirkung der *langsamen Neutronen*. Diese langsamen Neutronen bewegen sich aber nur mit einer Geschwindigkeit von zirka 2 km pro Sekunde. Sie gelangen so nur langsam in die Nähe spaltbarer Atomkerne und reagieren daher auch so langsam mit ihnen, daß der Reaktor schlimmstenfalls in ziemlich gemächlichem Tempo schmelzen und verdampfen würde. Da aber die Struktur des Reaktors schon bald nach Einsetzen solcher Vorgänge gestört werden müßte, würde er wahrscheinlich überhaupt aufhören, die Kettenreaktion zu unterhalten, noch ehe sich sehr viel Energie entwickelt hat.

In einer wirksamen *Atombombe* muß also eine Kettenreaktion stattfinden, die durch *schnelle Neutronen* unterhalten wird. Die Neutronen müssen annähernd die Geschwindigkeit behalten, mit der sie bei der Kernspaltung geboren werden — eine Geschwindigkeit von etwa 15.000 km pro Sekunde. Die Neutronen leben dann in einer Bombe nur etwa $\frac{1}{1.000.000.000}$ ($=10^{-9}$) Sekunde, während sie im Reaktor immerhin einige tausendstel Sekunden leben. Es darf also kein Moderator gegenwärtig sein, vielmehr muß die Bombe aus reinem geeigneten Spaltstoff bestehen.

Welcher Spaltstoff ist geeignet? — In reinem natür-

lichem Uran ist eine Kernkettenreaktion überhaupt nicht möglich⁷⁾. Wie in Abschnitt VI erläutert wurde, gehen in diesem Material zu viele Neutronen durch Reaktionen mit Uran 238 verloren, die mit der Kernspaltung konkurrieren. Für die Atombombe kommt also nur Spaltstoff in Betracht, der das Uran 238 an Spaltbarkeit übertrifft, also Uran 235 oder Plutonium 239 oder Uran 233 (vgl. Abschnitt VII, 6).

Man kann das leicht spaltbare Uran 235 aus natürlichem Uran isolieren und dann für Bomben verwenden. Diese Verfahren sind aber schwierig und kostspielig. Es handelt sich ja nicht um die Trennung verschiedener Elemente, die nach chemischen Methoden erfolgen kann, sondern um die Trennung des Uran 235 von seinem Isotop Uran 238, also um die Trennung chemisch identischer Atomarten. Man darf wohl annehmen, daß die Bombenerzeugung auf Basis der Isotopentrennung (also aus Uran 235) gegenüber der Bombenerzeugung aus Plutonium sich als weniger rationell erwiesen hat und daher einigermaßen in den Hintergrund getreten ist. Wir werden deshalb auf die Verfahren zur Isotopentrennung nicht näher eingehen, sondern uns auf die Diskussion der Plutoniumbombe beschränken. Die Verfahren zur Isotopentrennung sind in Thirring's Buch¹⁴⁾ beschrieben.

2. Der Bau der Atombombe

Auch in einer Atombombe, 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. Eine Atombombe soll 20.000 Tonnen Trinitrotoluol (TNT oder Trotyl — „gewöhnliche Bombenfüllung“) wirkungsgleich sein⁷⁾. (Allerdings ist die Sprengwirkung in der Nähe des Zentrums der Atombombenexplosion zu sehr konzentriert, d. h. das Übermaß an Wirkung bleibt unausgenützt.) Weiter ist die Atombombe insofern dem TNT überlegen, als sie todbringende Neutronen- und Gammastrahlung emittiert.

Um die Zerstäubung der Bombe möglichst lange hinauszuzögern, wird sie mit einem Mantel umgeben, durch den die Sprengladung verdämmt wird. Die Kettenreaktion kann sich also vor der Zerstäubung der Bombe einigermaßen entfalten. Daneben entfaltet der Mantel auch Reflektorwirkung 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 99). 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 Masse 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 zwischen 1 und 100 kg⁷⁾. Man

bedenke, daß 1 kg Uran nur einem Würfel von weniger als vier Zentimeter Kantenlänge entspricht.

Eine wirksame Atomexplosion kann nicht hervor- gebracht werden, indem man zwei unter-kritische Stücke Spaltstoff, die *zusammen* die kritische Masse über- schreiten, *allmählich* in Berührung bringt. In diesem Falle würde eine schwache Explosion schon in dem Augenblick erfolgen, in dem die kritische Masse in einem sehr geringen Maß 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 keine verfrühte Explosion auftreten kann. Eine Möglichkeit besteht darin, die beiden Teile durch eine gewöhnliche Sprengladung gegeneinander zu schießen. Jedenfalls dürfte der notwendige Mecha- nismus zur Auslösung mehr wiegen als die eigentliche Bombe. Der ganze Apparat muß von einem Fallschirm getragen werden, wenn der Abwurf von einem Flugzeug aus erfolgt und die Explosion in einer gewissen Höhe stattfinden soll, wie dies über Hiroshima der Fall war.

Die Temperatur der explodierenden Atombombe dürfte von der Größenordnung einer Million Grad sein. Sie übertrifft damit die Temperatur der Sonnenober- fläche etwa um das 200fache.

3. Die Wirkung der Atombombe

Aus der Tatsache, daß eine Bombe, die die kritische Größe nicht erreicht, überhaupt nicht explodiert, ergibt sich, daß man keine Bomben erzeugen kann, die nur beschränkte Sprengwirkung besäßen. Man kann daher keine „Probeexplosion“ mit einer „kleinen Bombe“ veranstalten. In jedem Fall ist die Wirkung verheerend, sobald überhaupt Explosion eintritt. Daher kommt die Atombombe als Infanteriewaffe wohl nicht in Be-

tracht. Vielmehr kann sie nur der Vernichtung großer Objekte und besonders von Städten dienen. *Die Atombombe ist ihrem Wesen nach eine Waffe der Massenvernichtung.* Ihrer verheerenden Wirkung fallen unterschiedslos Militär und Zivilbevölkerung, Männer und Frauen, Kinder und Greise zum Opfer. Dieser Mangel an Eignung der Atombombe für den Kampf zwischen Armeen wird noch durch einen wichtigen Umstand verstärkt: Infolge der Radioaktivität der Spaltprodukte, die sich bei der Explosion der Bombe über das belegte Gebiet ausbreiten, wird dieses auch für den Besitzer der Atombombe unbetretbar gemacht.

Zu den Todesursachen bei Explosion von Atombomben gehören: Erschlagenwerden durch einstürzendes Gemäuer, Verbrennen durch die intensive Wärmestrahlung, tödliche Schädigung durch die radioaktive Strahlung. Der Tod durch Strahlenschädigung, die vor allem im Augenblick der Explosion erfolgt, tritt erst nach Tagen oder Wochen ein. In welchem Ausmaß das Gelände radioaktiv gemacht wird und daher nachträglich gefährliche Strahlungsmengen emittiert, hängt von der Höhe über dem Erdboden ab, in der die Bombe zur Explosion gebracht wird. Erfolgt die Explosion in beträchtlicher Höhe, so werden die radioaktiven Spaltprodukte durch den gewaltigen Luftzug, der bei der Erhitzung nach oben drängt, aufwärtsgerissen und dabei durch die Luftmassen verdünnt.

Todesursache bei Einwirkung radioaktiver Strahlen ist meist *akute Blutlosigkeit* (Anämie) durch Zerstörung der blutbildenden Zellen im Knochenmark. Außerdem entsteht *Sterilität* durch Beeinträchtigung der Geschlechtszellen. *Fehl- und Mißgeburten* treten auf. Auch *Krebs* kann erzeugt werden.

Die Radioaktivität der Spaltprodukte kann natürlich auch für sich allein militärisch ausgenützt werden. Die Gefahr droht, daß die Männer, die heute die Atombombe in den Mittelpunkt ihrer Angriffspläne setzen, die enormen Mengen an Spaltprodukten, die bei der Um-

lösung des Urans aus Reaktoren anfallen (siehe Abschnitt VII, 4), zur Vergiftung des Gegners verwendet werden.

In Hiroshima¹⁵⁾ wurden durch eine Atombombe etwa 85.000 Menschen, überwiegend Zivilpersonen, ohne Warnung getötet. Innerhalb eines Kreises von 400 Meter Halbmesser um den Mittelpunkt der Sprengwirkung wurden 95 % der dort weilenden Bevölkerung ums Leben gebracht (*Abb. 24, 25 und 26*). Selbst in einer Entfernung von 1700 bis 2500 Meter starben noch immer 13 %. In welchem Ausmaß die Überlebenden, ja auch ihre Nachkommenschaft durch die Strahlungswirkung dauernd geschädigt sind, kann erst die Zukunft voll erweisen.

Unter gewissen Umständen kann der Atomsprenstoff auch zu Sprengungen mit friedlicher Zielsetzung herangezogen werden. Erstmals berichtete eine Berliner Tageszeitung im September 1949, daß Atomsprenstoff in Sibirien dazu verwendet 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 wird Millionen Menschen neue Siedlungsgebiete und Heimstätten erschließen.

Die Verwendung der Atomenergie zu Vernichtungszwecken ist eine Verirrung. Sie ist ein Ausdruck dafür, daß die gesellschaftliche und die politische Entwicklung der Menschheit mit ihrer technischen und wirtschaftlichen Entwicklung nicht Schritt gehalten hat. Die Abschaffung der Atombombe ist ein Gebot der Stunde. Die Diskussion der Frage, auf welche Weise dieses Ziel erreicht werden kann, überschreitet den Rahmen dieses Büchleins. Es ist aber klar, daß gleichzeitig zwei Ziele erreicht werden müssen: (A) Die wirksame Ächtung der Atombombe, und (B) die Erschließung aller Möglichkeiten zur schnellsten Nutzbarmachung der Atomenergie gemäß den energetischen Bedürfnissen der einzelnen Länder, damit die Lebenshaltung der Menschheit auf ein höheres Niveau gehoben werde.

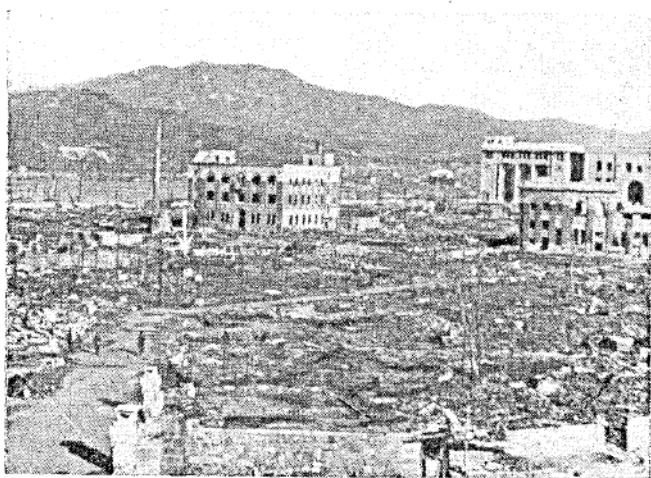


Abb. 24 und 25

Verwüstungen nach dem Abwurf der amerikanischen Atom-
bombe auf die japanische Stadt Hiroshima und ihre Zivil-
bevölkerung. — Der weiße Pfeil bezeichnet den Ort unter-
halb der Explosionsstelle¹⁵⁾.

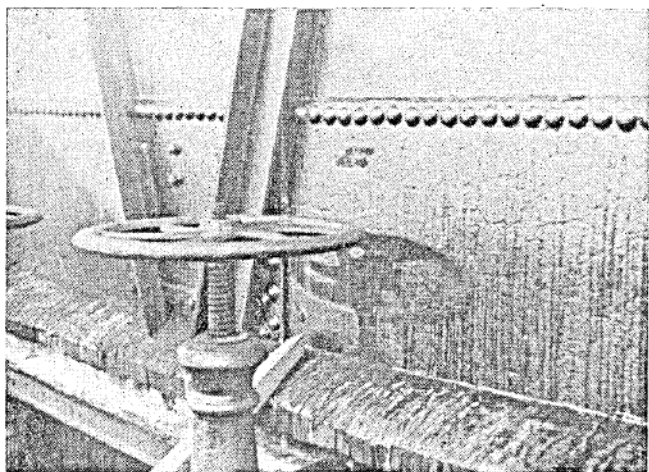


Abb. 26

Wirkung der Hitzestrahlung bei der Atombombenexplosion über Hiroshima¹⁵⁾

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.

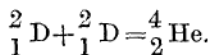
4. Die Wasserstoff- oder Superatombombe

Um die Jahreswende 1949/50 hat der Chef der amerikanischen Regierung deren Beschluß bekanntgemacht, *Superatombomben* herzustellen. Diese Bomben werden auch als *Wasserstoffbomben* bezeichnet. Niemand hat bisher auch nur einen Vorschlag gemacht, das Prinzip der Superbombe für friedlich-nutzbare Zwecke auszuwerten. Es handelt sich um ein reines Mittel der Zerstörung, und zwar soll es sich nach der Absicht ihrer Urheber um ein Mittel der Massenvernichtung handeln, das alle bisherigen Mittel einschließlich der Uranbombe

in den Schatten stellt. Ob die Konstruktion von Superbomben gelingen wird, ist noch nicht sicher. Jedenfalls aber widerspricht der Gedanke der Superbombe, so sehr er auch jedem humanitären Prinzip widerspricht, keinem bisher bekannten Prinzip der Physik.

In Abschnitt V, 4, 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 mehreren Millionen Grad (außer wenn man sie in Zyklotrons oder anderen, dem gleichen Zweck dienenden Geräten in ionisiertem Zustand entsprechend elektrisch beschleunigt). Übrigens verlieren die leichten Atomkerne ihre sämtlichen Hüllenelektronen, gehen also in Ionen über, sobald sie sich schnell bewegen. Temperaturen von vielen Millionen Grad herrschen im Inneren der Sonne und anderer Fixsterne. Dort erfolgen daher auch die thermonuklearen Reaktionen, die die Energiequelle der Himmelskörper darstellen.

Die in *Tabelle III* (Seite 76) angeführte thermonukleare Reaktion (Aufbau von Helium aus Wasserstoff) stellt im wesentlichen die Reaktion dar, von der unsere Sonne „lebt“. Für die Anwendung in einer Superbombe 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 Deuteriumkerne (Kerne des schweren Wasserstoffs) miteinander:



Diese Reaktion liefert je Masseneinheit bloß um ungefähr 15 % weniger Energie als die Synthese von Helium aus leichtem Wasserstoff gemäß *Tabelle III*, sie liefert aber noch immer das Siebenfache der Energie der Uranspaltung. Die hier ins Auge gefaßte D-D-Reaktion erfordert aber die Annäherung von nur zwei (ebenfalls einfach elektrisch geladenen) Atomkernen aneinander, dürfte also verhältnismäßig leicht verlaufen. Eine Superbombe könnte deshalb im wesentlichen z. B. aus einem Ball Deuteriumgas bestehen, der irgendwie an einer Zündstelle auf eine Temperatur von einigen Millionen Grad erhitzt wird. Die Zündung kann durch eine der altmodischen Uranbomben bewerkstelligt werden. Sodann läuft die Reaktion als Kettenreaktion selbsttätig weiter. — Natürlich kommen auch andere thermonukleare Reaktionen in Betracht.

Der „Vorteil“ der Superbombe besteht nicht nur darin, daß man Uran spart und das Rohmaterial aus jedem Wassertümpel beziehen kann. Wichtiger ist, daß eine kritische Größe hier praktisch nicht existiert. Ein noch so großer Deuteriumball explodiert wohl kaum von selbst, da nirgends die notwendige Temperatur herrscht. Man kann daher offenbar die Uranbombe, deren Größe beschränkt ist, mit einem beliebig großen explosionsfähigen Deuteriummantel umgeben. Auf diese Weise hoffen die Urheber der Superatombombe, die zerstörende Wirkung der Uranbombe auf das Zehn-, Hundert- oder Tausendfache steigern zu können.

X. Die Verwendung von Radioelementen zu Forschungszwecken

1. Radioaktive Indikatoren

Neben der Verwendung der Atomenergie zur Wärme- und zur Elektrizitätserzeugung sowie für zivile und für militärische Sprengungen ist noch die schon in Abschnitt VII, 4, angedeutete Verwendung zu Forschungszwecken zu erwähnen. Vor allem können die in den Reaktoren gewinnbaren sehr großen Mengen an Radioelementen als sogenannte „radioaktive Indikatoren“ verwendet werden. Die radioaktiven Isotope können chemisch von den inaktiven Isotopen derselben Elemente praktisch nicht unterschieden werden (siehe Abschnitt IV, 2). Dieser Umstand kann nun, wie Hevesy und Paneth am Wiener Radiuminstitut vor dem Ersten Weltkrieg zuerst betont haben, zur Aufklärung von Stoffwechselfvorgängen Anwendung finden. Zum Beispiel muß es die Biologen und die Mediziner interessieren, innerhalb welcher Zeit Eisen, das einem Versuchstier in der Nahrung zugeführt wird, in dem Farbstoff der roten Blutkörperchen (Hämoglobin) auftaucht, der bekanntlich Eisen enthält. Diese Frage war vor der Entdeckung der Radioaktivität kaum zu beantworten. Man konnte ja das vorher im Körper schon vorhandene Eisen von dem neu zugeführten Eisen nicht unterscheiden. Nun aber läßt sich ein einfaches Experiment anstellen. Man setzt dem Futter, das seine übliche Menge Eisen enthält, noch *radioaktives Eisen* in einer Menge zu, die unwägbar klein ist und auch keine schädliche Strahlenwirkung mehr hervorruft. Das Radio-

eisen, das chemisch mit dem gewöhnlichen Eisen völlig identisch ist, wandert daher mit der gleichen Geschwindigkeit wie gewöhnliches Eisen durch den Körper. *Es zeigt aber durch seine Radioaktivität ständig den Ort an, an dem es sich gerade befindet.* Wenn man also dem Versuchstier von Zeit zu Zeit eine Probe Hämoglobin entnimmt, erkennt man an der Radioaktivität, wie weit schon ein Ersatz des alten Eisens durch neu zugeführtes Eisen erfolgt ist. Man kann auf diese Weise die Umschlagszeit des Eisens im Organismus messen.

Es ist klar, daß dieses Prinzip nicht nur bei der Erforschung von Vorgängen in der lebenden Substanz anwendbar ist, sondern auch bei der Klärung anderer Prozesse, und daß man in dieser Hinsicht den Begriff des *Stoffwechsels* weiter fassen kann. Man ist jetzt in der Lage, festzustellen, wie schnell Atome zwischen

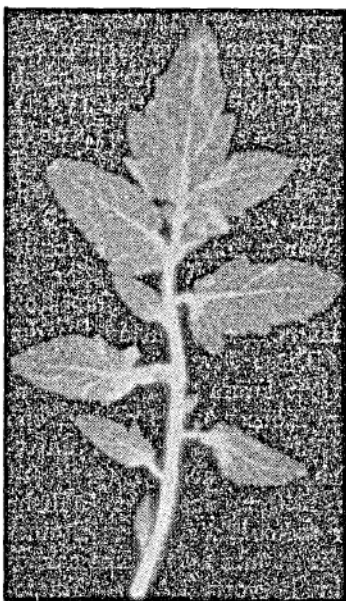


Abb. 27

Verteilung von Radio-phosphor 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 radio-phosphorhaltigen Teile die Platte schwärzten. Im Bild sind die aktiven Stellen hell, da es ein Positiv ist.

(Aufnahme Stout)

verschiedenen Molekülen hin- und herwechseln können. Zum Beispiel kann man Zucker, also eine wasserstoffhaltige Verbindung, in radioaktiv gemachtem Wasser auflösen und die Eintrittsgeschwindigkeit des Radiowasserstoffes in das Zuckermolekül messen. Die Chemie wird durch diese Methode ungemein bereichert. — Aber auch vorher unlösbar gewesene *technische* Probleme werden lösbar. Zum Beispiel stellt die Wanderung von Gasen oder von Flüssigkeiten durch komplizierte Röhrensysteme in gewissem Sinne ein Stoffwechselproblem dar. In der Ölindustrie macht man Mineralöle radioaktiv, um festzustellen, wie schnell Öl in verschiedene Teile des Röhrensystems eindringt.

Die beschriebene Methode wird als die *Methode der radioaktiven Indikatoren* bezeichnet, weil die Radioelemente durch ihre Aktivität anzeigen (indizieren), wo sich eine Gruppe von sonst chemisch nicht unterscheidbaren Teilchen gerade befindet. Die aktiven



Abb. 28

Verschiedene Verteilung von Radiokalzium 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)

Atome bezeichnet man auch als „markiert“, da man mit ihnen arbeiten kann, als ob man ihnen zur Unterscheidung Schildchen angeklebt hätte, ohne sonst ihre Eigenschaften zu verändern. Es wurde mit einem gewissen Recht behauptet, daß die Bedeutung der radioaktiven Indikatoren für Naturwissenschaft und Technik mit jener des Mikroskops wetteifert.

Die Wirkungsweise radioaktiver Indikatoren ist in den *Abbildungen 27* und *28* anschaulich gemacht.

2. Radioelemente in der Therapie

Die Mediziner setzen auch auf die Verwendung von Radioelementen zu therapeutischen Zwecken bedeutende Hoffnung. Die Zerstörung von *Krebsgewebe* durch radioaktive Strahlung ist bekannt. Sie beruht auf der großen Empfindlichkeit schnell wachsenden Gewebes gegen Strahlen. Das bisher verwendete Radium läßt sich nun durch einen künstlich erzeugten Strahler ersetzen. Aus praktischen Gründen eignet sich *Radiokobalt* gut, das eine Halbwertszeit von $5\frac{1}{3}$ Jahren besitzt. Nadeln aus Kobalt werden im Reaktor mit Neutronen aktiviert. Sie emittieren eine besser definierte Gammastrahlung als das Radium, sind billiger und können, da es sich um ein Metall handelt, in handlicher Gestalt hergestellt werden.

Interessanter, aber auch schwieriger zu lösen, ist das Problem der direkten Einführung radioaktiver Substanz in den Stoffwechsel des krebserkrankten Organismus. Die Radioelemente wandern im Körper entsprechend ihrer chemischen Natur. Zum Beispiel wird *Radiojod* ebenso wie gewöhnliches Jod in der *Schilddrüse* angereichert. Man hat nun versucht, Patienten mit Schilddrüsenkrebs Radiojod einzugeben, damit das Radioelement an Ort und Stelle seine zerstörende Tätigkeit entfalten kann. Ähnlich kann z. B. *Radiophosphor* in den Knochen zur Wirkung kommen, in denen Phosphor als phosphor-

saurer Kalk angereichert wird. Die Methode ist noch im Versuchsstadium und ein abschließendes Urteil wäre verfrüht. Jedenfalls aber ist *wegen der Schädlichkeit der Strahlung auch für gesundes Gewebe äußerste Vorsicht am Platze*. — Auch mit *Neutronenstrahlen* hat man es in der *Krebstherapie* versucht. Sie scheinen aber im Vergleich zu Radium oder Radiokobalt keinen besonderen Vorteil zu bieten.

XI. Einige Bemerkungen zum Problem Idealismus – Materialismus

I. Idealistische und materialistische Auffassung

Zu Ende unserer Übersicht wollen wir aus den neuen Erkenntnissen noch einige allgemeine Schlüsse ziehen. Ein wichtiger Punkt ist: Die praktischen Erfolge bei der Entwicklung der Atomenergie stellen gleichzeitig einen wesentlichen Erfolg der materialistischen gegenüber der idealistischen Weltanschauung dar.

Die verschiedenen Spielarten der *idealistischen* Weltanschauung 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 die Gegenstände der Außenwelt nur als „Komplexe von Empfindungen“ gelten lassen. So soll es im Sinne der Auffassungen Machs durchaus unrichtig sein, z. B. von einer Kegelkugel als einem äußeren Gegenstand zu sprechen. Statt dessen müßte man nach Mach den Empfindungskomplex „rund, glatt, hart, braun, schwer“ einführen. Nach Mach darf man gar nicht einmal fragen, ob die Kegelkugel existiere. Das einzige, was existiert, sollen unsere eigenen Empfindungen sein. In weniger extremen Formen des Idealismus, 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 das „Ding an sich“ folgt, diesem gewissermaßen durch den beobachtenden Geist aufgezwungen werden. Raum, Zeit und Kausalität (Gesetzlichkeit) sollen keine vom Menschen unabhängig existierenden Wesenheiten, sondern erst 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 sind also davon unabhängig, 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 geregt 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 gestäubt. So wollte z. B. Ernst Mach die Atome höchstens als ein „Bild“ gelten lassen. Nach Mach, dessen Auffassungen von Boltzmann scharf bekämpft wurden (siehe Abschnitt I, 3), 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.

Wenn die Atome tatsächlich nur ein Hirngespinnst wären (soweit die radikalen Idealisten überhaupt 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.

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 materiell (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. Das Entscheidende vom Standpunkt des Materialisten ist, daß auch diese Schwingungsvorgänge Merkmale der realen Außenwelt sind und nicht willkürliche Annahmen des menschlichen Geistes.

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, Blackett und Bernal, bewußte Materialisten. Auch Thirring bekennt sich in seinem Buch „Anti-Nietzsche, Anti-Spengler“ zum dialektischen Materialismus im Einklang mit einer Definition Stalins. — 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 allzu sehr 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.

2. 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 großen Wert darauf, die *Materie in ihrer historischen Entwicklung* zu betrachten.

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 Entwicklungsvorganges und weist je nach dem Stadium, in dem sie sich befindet, die verschiedensten Eigenschaften auf.

Nehmen wir z. B. unsere irdische Materie. Als die Erde vor einigen Milliarden Jahren noch einen Teil der Sonne bildete, hatten auch die Elementarteilchen, aus denen unsere Erdmaterie zusammengesetzt ist, die Temperatur der Sonne. Bei dieser Temperatur sind die Geschwindigkeiten der Elementarteilchen 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 über die Atome nur aus der Betrachtung der Sonne schöpfen müßte, so hätte er keine Erfahrung z. B. des Wasserstoffatoms, da dieses unter den Verhältnissen in der Sonne gar nicht existenzfähig ist. 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! — Unter den Bedingungen des Sonneninneren kommen also Atomeigenschaften nicht zur Geltung, die auf der Existenz der Elektronenhüllen beruhen, z. B. chemische Verbindungsfähigkeit, Farbe usw. Die Atome der Erdmaterie hatten in jener frühen Entwicklungsepoche demnach wenig Ähnlichkeit mit den Atomen, wie wir sie heute kennen.

Nach Abkühlung als Bestandteile der Erdkruste erhielten die Atome ihre vollen Elektronenhüllen und wurden voll chemisch verbindungsfähig. Es bildeten sich zunächst, wie vor allem die Überlegungen des russischen Forschers Oparin gezeigt haben, anorganische und einfachere organische Verbindungen, also Moleküle. Durch Kondensation von Atomen und Molekülen entstanden

kompliziertere Einheiten, wie Festkörper (Kristalle) und Flüssigkeiten. Wieder finden wir, daß mit der fortschreitenden Entwicklung der Materie nicht einfach nur gewisse Eigenschaften, die früher schon vorhanden waren, sich besser ausprägen. Die Ausbildung der Elektronenhüllen und der Moleküle bringt vielmehr *neue* Eigenschaften zum Vorschein, die der Beobachter in früheren Entwicklungsstadien überhaupt nicht hätte voraussehen können. Die Materialisten drücken diesen Sachverhalt gerne dadurch aus, daß sie von einem *Umschlagen der Quantität in Qualität* (Übergang vom nackten Atomkern über das komplette Atom und das Molekül zur „Kondensation“ als Kristall oder als Flüssigkeit) sprechen.

Hegel, der zwar eine idealistische Philosophie vertrat, der aber nichtsdestoweniger von Marx und Engels in mancher Hinsicht hoch geschätzt 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 Zusammentreten, eine Kombination, die Entstehung komplexer Einheiten bewirken, und andererseits in dem zerstörenden Einfluß der ungeordneten Temperaturbewegung. Gleichwohl ermöglicht gerade die Temperaturbewegung die Umwandlung von weniger stabilen in stabilere Formen der Materie, indem sie die Teilchen sozusagen durcheinanderschüttelt.

Oparin hat auch konkrete Vorstellungen entwickelt, auf welche Weise die weitere Entwicklung zur Entstehung des Lebens auf der Erde führen kann. Die lebende Substanz weist wieder neue Merkmale auf, die an niedrigeren Entwicklungsstufen der Materie nicht beobachtet werden können. Die Diskussion dieser Entwicklung überschreitet selbstverständlich den Rahmen dieses Büchleins.

Literaturangaben

- 1) Farrington, „Die Wissenschaft der Griechen und ihre Bedeutung für uns“, Wien (1947).
- 2) Ehrenfeld, „Grundriß einer Entwicklungsgeschichte der chemischen Atomistik“, Heidelberg (1906).
- 3) Boltzmann, „Populäre Schriften“, Leipzig (1905).
- 4) Soddy, „Die Natur des Radium“, Leipzig (1909).
- 5) Wells, „The World Set Free“, Leipzig (1914).
- 6) Zinn und Szilard, „Physical Review“ **56**, 619 (1939).
- 7) Smyth, „The Military Applications of Nuclear Power“, Washington (1945).
- 8) „Nature“ **162**, 56 (1948).
- 9) Lawrence, „Bulletin of the Atomic Scientists“ **3**, 325 (1947).
- 10) Siehe „The Science and Engineering of Nuclear Power“, Bd. II, Cambridge, Mass. (1949).
- 11) Schurr, „Bulletin of the Atomic Scientists“ **3**, 117 (1947).
- 12) Saha, „Nature“ **155**, 221 (1945).
- 13) Blackett, „Angst, Krieg und die Atombombe“, Zürich (1948).
- 14) Thirring, „Die Geschichte der Atombombe“, Wien (1946).
- 15) „The Effects of the Atomic Bombs at Hiroshima and Nagasaki“, London (1946).

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	5
I. Aus der Geschichte der Atomistik	
1. Die antiken Atomisten	7
2. Die moderne Atomistik	9
3. Der Atomist Ludwig Boltzmann	10
II. Die Atome und ihre Bewegung	
1. Die Atome in Gasen	13
2. Die Atome in Flüssigkeiten	19
3. Die Atome in Festkörpern	21
III. Der innere Aufbau der Atome	
1. Das Planetenmodell des Atoms	24
2. Die Energiezustände der Atome	28
3. Das Periodische System der Elemente	30
4. Die Bildung chemischer Verbindungen	37
IV. Die Atomkerne	
1. Ladungszahl und Massenzahl; Proton und Neutron	42
2. Isotope	45
3. Stabile und instabile Atomkerne; Radioaktivität	48
4. Methoden des Nachweises radioaktiver Strahlen	54
5. Altersbestimmung auf Grund der Radioaktivität	58
6. Künstliche Kernreaktionen	60
7. Die neue Alchimie	64

V. Die Energien der Atomkerne

1. Die Analogie zwischen chemischen Reaktionen und Kernreaktionen 66
2. Die im Gleichgewicht vorhandenen Mengen an radioaktiven Stoffen 70
3. Das Zentralproblem der Atomkernenergie 72
4. Die Größe der Atomenergie 76

VI. Die Kernspaltung des Urans

1. Die Kernspaltung als neuartige Kernreaktion 80
2. Die Kernspaltung durch Neutronen 85
3. Die Wärmetönung der Kernspaltung 87
4. Die Neutronenemission bei der Kernspaltung; Gedanke der Kettenreaktion 89
5. Der Begriff des Reproduktionsfaktors 92
6. Die Verlangsamung von Neutronen 95
7. Erster Nachweis einer potentiell divergenten und einer divergenten Kette. 97

VII. Der Aufbau von Reaktoren

1. Stufen des Reaktorenbaues 102
2. Reaktoren der Stufe I (energielose Reaktoren) 102
3. Reaktoren der Stufe II 107
4. Die Erzeugung von Radioelementen in Reaktoren 108
5. Reaktoren der Stufe III 109
6. Die Entstehung von Plutonium 110
7. Die Züchtung von Spaltstoff 112
8. Nutzbare Wärme oder Sprengstoff? 114
9. Warum hatte Deutschland keinen Reaktor? 118

VIII. Die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie

1. Sind die Rohstofflager hinreichend? 122
2. Die Wirtschaftlichkeit eines Atomkraftwerkes 125

3. Kosten der Elektroenergie an verschiedenen Standorten	127
4. Wird Uran Kohle einfach ersetzen? . . .	129
5. Ein weiteres Hindernis der Entfaltung der Atomenergie.	130
6. Atomenergie für Fahrzeuge?	131
IX. Die Atombombe	
1. Die Kettenreaktion mit schnellen Neutronen	133
2. Der Bau der Atombombe	134
3. Die Wirkung der Atombombe	136
4. Die Wasserstoff- oder Superatombombe	140
X. Die Verwendung von Radioelementen zu Forschungszwecken	
1. Radioaktive Indikatoren	143
2. Radioelemente in der Therapie	146
XI. Einige Bemerkungen zum Problem Idealismus — Materialismus	
1. Idealistische und materialistische Auffassung	148
2. Die Atome und der Entwicklungsgedanke	151
Literaturangaben	154

T A G B L A T T - B I B L I O T H E K

H A N D B Ü C H E R

Chr. Wurdinger-Schützenhofer

Kochbuch für heute und morgen

216 Seiten

S 7,50

Ida Pisco

Einsiedekochbuch für Obst und Gemüse

72 Seiten

S 4,50

Anton Eipeldauer

Schreber- und Hausgartenkultur

240 Seiten / illustriert

S 9,50

Beran-Watzl-Fischer

**Der Pflanzenarzt im Obst-, Schreber- und
Hausgarten**

288 Seiten / illustriert

S 9,50

Cerny-Waplinger

Kleintier- und Geflügelzucht

128 Seiten / illustriert

S 5,—

Ludwig Berg

Das Kleinkind

Kleine Erziehungslehre für jedermann

140 Seiten / illustriert

S 9,—

In allen Buchhandlungen erhältlich

A U S L I E F E R U N G :

G L O B U S - B U C H V E R T R I E B

Wien I, Fleischmarkt 1

TA G B L A T T - B I B L I O T H E K

SCHÖNE LITERATUR

Albert Fuchs	Moderne österreichische Dichter	96 Seiten	S 2,50
A. Puschkin	Der Postmeister und andere Novellen	56 Seiten	S 1,50
Ernst Fischer	Franz Grillparzer	48 Seiten	S 1,50
Karl Schönherr	Ausgewählte Erzählungen	120 Seiten	S 2,50
A. Tschechow	Humoristische Erzählungen	112 Seiten	S 2,50
N. Gogol	Phantastische Novellen 1. Band	128 Seiten	S 2,—
N. Gogol	Phantastische Novellen 2. Band	176 Seiten	S 2,50
Franz Werfel	Kämpfe der Schwachen	112 Seiten	S 2,50
J. J. David	Die Hanna und andere Erzählungen	144 Seiten	S 2,50
Johann Nestroy	Höllenangst	64 Seiten	S 2,50

In allen Buchhandlungen erhältlich

AUSLIEFERUNG:

GLOBUS-BUCHVERTRIEB

Wien I, Fleischmarkt 1



ZBPH



+P8625402

f. v. Prof. Prσίbrum?

Tagblatt-Bibliothek im Globus Verlag Wien

Populäre Wissenschaft

Dr. Ludwig Berg	Schilling
Das Kleinkind	9,—
Gordon Childe	
Eine Geschichte der Werkzeuge	3,—
Gordon Childe	
Triebkräfte des Geschehens	5,50
M. A. Gremjatzkij	
So wurde der Mensch	5,—
G. A. Gurjew	
Was ist das Weltall?	1,50
B. A. Keller	
Wie das Leben entstanden ist . .	1,—
A. Popowskij	
Auf den Spuren des Lebens . . .	2,—
W. K. Nikolskij-N. F. Jakowlew	
Wie die Menschen sprechen lernten	4,—
M. F. Subbotin	
So wurde die Erde	2,50
A. Wolodin	
Die Elemente wüten	1,—
Dr. Erich Trapp	
Kräfte, die unsere Erde formen	13,—

Achten Sie auf unsere Neuerscheinungen

Auslieferung:

Globus-Buchvertrieb, Wien I, Fleischmarkt 1
Erhältlich in allen Buchhandlungen