

**Zeitschrift:** Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

**Herausgeber:** Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

**Band:** 130 (1950)

**Artikel:** Die Trennung der Isotope und ihre Verwendung in der Forschung

**Autor:** Clusius, Klaus

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-90470>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 29.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# **Die Trennung der Isotope und ihre Verwendung in der Forschung**

Von

KLAUS CLUSIUS

Physikalisch-Chemisches Institut der Universität Zürich

Die Verwendung der Isotope für Forschungszwecke beginnt 1913, als v. HEVESY und PANETH die Untrennbarkeit des gewöhnlichen Bleis vom Radium D benutzten, um die Löslichkeit von Bleisulfid und Bleichromat zu bestimmen. Die allgemeine Entwicklung der Isotopentechnik kam aber erst in den dreißiger Jahren mehr und mehr in Gang, um im letzten Jahrzehnt einen früher wohl niemals erwarteten Aufschwung zu nehmen. Vor 20 Jahren war es noch möglich, die Isotopenliteratur auf wenigen 4<sup>o</sup>-Seiten unterzubringen; heute ist allein für den schweren Wasserstoff ein 350 Seiten starkes Buch gerade ausreichend, um den Literaturnachweis bis Ende 1949, nicht aber etwa eine Beschreibung dieses Elementes aufzunehmen. Ein 1948 erschienener Bericht v. HEVESYS über die Anwendung der Isotope auf biologische Fragen umfaßt gegen 1000 Arbeiten. Daraus kann man ermessen, welchen Umfang die gesamte Isotopenliteratur bereits heute erreicht hat. Dabei haben wir allen Grund zu der Annahme, daß es sich nicht um eine Modeerscheinung – denn auch das gibt es –, sondern um die echte Blüte eines neuen Zweiges am Baum der Wissenschaft handelt, deren Früchte schon an vielen Stellen sichtbar werden. Die isotope Technik wird in Zukunft kein isoliertes Arbeitsgebiet einiger weniger Spezialisten bleiben, sondern allmählich als eine Methode allgemeiner und häufiger Anwendbarkeit alle Gebiete der Chemie und Physik durchdringen, eine Tatsache, auf die bei der Ausbildung des Nachwuchses gebührend Rücksicht genommen werden muß.

## **Das Atom und sein Aufbau**

Was sind nun Isotope? Wir wissen, daß es insgesamt 92 chemische Elemente gibt, die bis auf wenige Ausnahmen in der Natur aufgefunden und gründlich untersucht worden sind. Die Elemente bestehen aus Atomen, die wir uns als sehr kleine Kugeln von  $10^{-8}$  cm Durchmesser vorstellen können. Allerdings ist ein solches Atom keine homogene

Kugel. Es beherbergt vielmehr im Innern einen winzigen Kern, der eine positive elektrische Ladung trägt und fast die gesamte Masse des Atoms in sich vereinigt. Da der Durchmesser des Kerns nur  $10^{-13}$  cm beträgt, steht er zum ganzen Atom in einem Größenverhältnis wie etwa ein Stecknadelknopf zu einem Haus. Um den Kern sind so viele negativ geladene Elektronen angeordnet, daß sie die positive Kernladung gerade kompensieren, denn das ganze Atom erscheint nach außen hin elektrisch neutral.

Der Atomkern ist trotz seiner Kleinheit selbst wieder zusammengesetzter Natur. Er enthält zwei Teilchensorten, die Protonen und die Neutronen. Die Protonen tragen eine positive Elementarladung und haben etwa die Masse eines Wasserstoffatoms. Die Neutronen haben ungefähr dieselbe Masse – in Wirklichkeit sind sie um 0,08% schwerer – besitzen aber keine Ladung. Der Kern eines Elementes, z. B. vom Sauerstoff mit dem Atomgewicht 16, ist aus 8 Protonen und 8 Neutronen aufgebaut; das Atom selbst hat noch 8 negative Elektronen als eine Art Hülle, die die 8 positiven Protonenladungen des Kerns neutralisieren. Der Umstand, daß der Sauerstoffkern gleich viele Protonen wie Neutronen enthält, ist für die leichten Elemente charakteristisch. Die Kerne der schweren Elemente haben dagegen einen Neutronenüberschuß, der um so größer wird, je schwerer das Element ist. So besteht der Kern des schwersten in der Natur gefundenen Atoms, des Urans mit der Masse 238, aus 92 Protonen und 146 Neutronen.

Alle *chemischen* Eigenschaften eines Elements werden durch das Verhalten der den Atomkern umgebenden Elektronen bestimmt, genauer gesagt durch das Verhalten der äußersten Elektronen. Die Chemie ist also physikalisch betrachtet eine Wissenschaft, die nicht besonders tief in das Atom eindringt, sie hängt eben von den Außenelektronen, ihrer Zahl, Verschiebbarkeit und Anordnung ab. Und doch ist der Atomkern auch für die Chemie wesentlich, da die Zahl der Elektronen in der Hülle eindeutig gleich der Zahl der Protonen im Kern ist. Somit ist die Protonenzahl entscheidend für den Chemismus des Atoms und legt als Ordnungszahl seine Stellung im periodischen System der Elemente fest.

Bei manchen Elementen sind die Kerne aller Atome untereinander identisch, so bei Beryllium, Fluor, Aluminium, Phosphor, Kobalt, Arsen, Jod, Gold, Wismut u. a. Beispielsweise besteht der Kern jedes in der Natur vorkommenden Phosphoratoms aus 15 Protonen und 16 Neutronen. Solche Elemente nennt man *Reinelemente*. Man kennt von ihnen 21. Die übrigen Elemente sind *Mischelemente*; bei ihnen stimmt zwar in den Kernen verschiedener Atome die Zahl der Protonen genau überein, aber die Zahl der Neutronen wird verschieden gefunden. So beim Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Chlor, Brom, Silber, Quecksilber usw. Beispielsweise haben von 100 Chloratomen zwar alle Atomkerne 17 Protonen, entsprechend seiner Ordnungszahl 17, aber 75 Kerne besitzen 18 Neutronen und die restlichen 25 deren 20. Diese beiden Sorten Chloratome mit den Massenzahlen 35 und 37 nennt man *Chlor-*

*Isotope* —  $^{35}\text{Cl}$  und  $^{37}\text{Cl}$ . Die Isotope eines Elementes unterscheiden sich also nur durch die Zahl der Neutronen, aber nicht durch die Anzahl der Protonen. Da nun die Protonenzahl als Ordnungszahl das chemische Verhalten bestimmt, wird dieses für die beiden Atomsorten identisch; beide bekommen also im periodischen System denselben Namen, «Chlor», und denselben Platz (*ἴσος τόπος*), woher der Name Isotope rührt.

Während Chlor, Stickstoff, Silber usw. nur zwei Isotope haben, weisen andere wie Sauerstoff, Magnesium, Argon usw. deren 3, Schwefel usw. 4 auf, usf. Die größte Anzahl von Isotopen findet sich beim Xenon mit 9 und beim Zinn mit 10 Atomsorten. Das Häufigkeitsverhältnis zweier Isotope eines Elements wird in der Natur innerhalb sehr enger Grenzen konstant und unabhängig von der Herkunft gefunden. Dabei kommen ganz extreme Verhältnisse vor. So sind z. B. die beiden Bromisotope fast gleich häufig, während das Helium von der Masse 4 noch einen etwa 10millionenmal selteneren Begleiter der Masse 3 hat.

### Trennverfahren für Isotope

Es mag auf den ersten Blick seltsam erscheinen, daß die Isotope für die Chemie eine große Bedeutung gewinnen konnten, da ihre chemische Identität wenig Reiz zu bieten scheint, sich überhaupt näher mit ihnen zu befassen. Aber tatsächlich liegt in dieser Eigenschaft gerade ihr Wert. Arbeitet man mit chemischen Verbindungen, die aus getrennten Isotopen aufgebaut sind, so ist man sicher, daß dadurch das Verhalten eines chemischen Systems oder biologischen Organismus nicht beeinflußt wird. Auf der anderen Seite gewinnen wir den ungeheuren Vorteil, in diesem Organismus oder chemischen Reaktionssystem, ja sogar innerhalb eines Moleküls oder gar eines seiner Bruchstücke dieses Isotop nach Ablauf der Reaktion dank seiner unterschiedlichen Kerneigenschaften wiederzufinden. Man kann also mit getrennten Isotopen einen analogen Versuch machen wie der Ornithologe, der auf einer Vogelwarte einzelne durchziehende Tiere eines Schwarmes von Zugvögeln beringt, sie im Schwarm wieder freiläßt und später aus dem Fundort dieser Individuen sich ein Bild über die gesamte Zugstraße macht; oder wie ein Jäger, der einem Junghasen das Ohr schlitzt, worauf man beim Abschuß Auskunft über das Wohngebiet und das Alter des Tieres bekommt. Auf solche Verfahren läuft die Anwendung der Isotope letzten Endes hinaus: Einmal muß man sich die zur Markierung geeigneten Isotope verschaffen, und zum andern muß man diese Isotope später wieder auffinden und nachweisen können.

Es liegt zunächst nahe, sich der natürlichen Isotopengemische zu bedienen und sie zu trennen oder wenigstens ihr Häufigkeitsverhältnis zu verschieben. Nach dem Gesagten wird man dazu nur solche Eigenschaften benützen können, die von der unterschiedlichen Masse der Isotope beeinflußt werden. Sehr weit ist man bei gasförmigen Elementen und ihren Verbindungen gekommen, da hier die einschlägigen Theorien gut entwickelt sind. Geringere Erfolge hat man bei Flüssigkeiten gehabt,





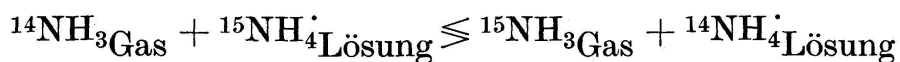
nerie, der die langjährige Erfahrung der Kieler Konstrukteure des Kreisel-Kompasses zugute kam, ist eine ingenieurmäßige Leistung ersten Ranges. Den hauptsächlichsten Anreiz zur Überwindung der zahlreichen Schwierigkeiten bietet der Umstand, daß bei der Zentrifuge im Gegensatz zu anderen Verfahren die Trennung unmittelbar von der Massendifferenz der Molekeln abhängt, wodurch auch bei schweren Elementen noch gute Anreicherungen gewährleistet sein sollten. Erfolgversprechende Anfänge sind erzielt worden, da die Häufigkeit der Xenon-, Selen- und Uranisotope um Prozente verschoben werden konnte. Für eine eigentliche Trennung muß aber die Apparatur noch weiter ausgestaltet und wohl auch durch das Gegenstromverfahren vervollkommen werden.

Hoffnungsvoll lassen sich in jüngster Zeit Versuche zur Trennung durch *Elektrolyse* an. Der Gedanke, die verschiedene Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen in wässriger Lösung heranzuziehen, war schon zeitig verfolgt worden, hatte aber zunächst kein rechtes Ergebnis, weil die Beweglichkeit der Ionen eher vom Volumen als der Masse abhängt. WASHBURN und UREY erbrachten dann 1932 den Nachweis, daß der schwere Wasserstoff beim Wegelektrolysieren einer großen Wassermenge im zurückbleibenden Rest angereichert und schließlich, wenn man das Verfahren weit genug treibt, rein erhalten wird. Dabei spielen neben der Beweglichkeit der Ionen die Vorgänge bei ihrer Dehydratation und Abscheidung am Elektrodenblech die ausschlaggebende, noch nicht ganz durchsichtige Rolle. 1 Kubikmeter Wasser liefert mit einem Energieaufwand von über 10 000 kWh erst 10 ccm 98% schweres Wasser. Da die Wasserelektrolyse großtechnisch ausgeübt wird, kann man sie mit der Gewinnung von schwerem Wasser koppeln und diese Verbindung zu einem Preis von etwa Fr. 2.— für das Gramm in den Handel bringen. Die Elektrolyse anderer Elemente in wässriger Lösung hat bisher noch zu keinem auch nur annähernd so großen Erfolg geführt. Hier sind jedenfalls die Trennwirkungen so klein, daß nur ein Gegenstromverfahren den entscheidenden Fortschritt bringen wird. Günstigere Bedingungen liegen in Salzschnmelzen vor, wie KLEMM und seine Mitarbeiter gezeigt haben. Sie konnten die Isotopenverhältnisse bei Lithium, Kalium, Cadmium und Thallium merklich verschieben, womit die generelle und prinzipielle Brauchbarkeit des Verfahrens jedenfalls dargetan ist.

Ein anderer Prozeß nutzt den Umstand aus, daß die Isotope von Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Neon und ihren Verbindungen, wie Kohlenoxyd und Wasser, einen kleinen, aber merklichen *Dampfdruckunterschied* zeigen. Die Ursache dieses Unterschiedes ist in einem von der Molekelmasse abhängigen Quanteneffekt zu suchen, der das Gleichgewicht zwischen dem flüssigen und gasförmigen Aggregatzustand bei leichten Molekeln ein wenig verschiebt. Der Chemiker trennt Gemische von Flüssigkeiten unterschiedlichen Dampfdruckes durch Rektifikation, d. h. eine kontinuierliche Destillation im Gegenstrom, ein Verfahren, das auch im vorliegenden Fall anwendbar ist. Wasser steht in beliebigen Mengen praktisch kostenlos zur Verfügung, so daß die Anreicherung der schweren Wasserstoff- und Sauerstoff-Isotope durch Rektifikation von



solchen Anordnung, manchmal allerdings auch an ihrem oberen angereichert wird:



Es ist bedeutungsvoll, daß dieser Prozeß gerade bei biologisch wichtigen Elementen durchführbar ist, so daß der großen Nachfrage halber schwerer Stickstoff und Kohlenstoff in Amerika in technischem Maßstab gewonnen und in den Handel gebracht werden. Der Preis dieser Isotope ist allerdings noch recht hoch, so kostet 1 g schwerer Stickstoff in 50%-iger Form etwa 300 \$ und 1 g 50%-iger schwerer Kohlenstoff etwa 400 \$. Diese Elemente sind mehr als 100mal so teuer wie Gold und Platin, obwohl man sie noch nicht einmal in reiner Form kaufen kann. Doch liegt es in der Natur der Sache, daß stark angereicherte Isotope wegen des großen Energie- und Arbeitsaufwandes bei ihrer Herstellung stets verhältnismäßig kostbare Substanzen bleiben werden.

Ein einfaches und für viele gasförmige und flüssige Stoffe anwendbares Verfahren benutzt die Trennwirkung der sogenannten *Thermosdiffusion*. Mit diesem Effekt wird jeder bekannt, der die Schwärzung über einem Ofen oder einem Dampfleitungsrohr betrachtet. In dem Temperaturgefälle, das in der heißen Luft nach der kalten Zimmerwand hin besteht, wandern die schweren Staubteilchen auf die kalte Wand zu, an der sie sich niederschlagen. Genau so diffundieren in einem Temperaturgefälle die Molekeln der schweren Isotope bevorzugt zur kalten Wand, während die leichten sich in der Nähe der Wärmequelle aufhalten. Auch hier ist die so erzielte Trennung zunächst winzig klein. Sie kann aber wieder durch das Gegenstromverfahren enorm verstärkt werden. Dies läßt sich dadurch herbeiführen, daß man die Heizfläche vertikal neben der Kühlfläche anordnet, wobei die leichten Molekeln nach der heißen Wand eilen und von dem an ihr konvektiv aufsteigenden Gasstrom nach oben mitgenommen werden, während die schweren Molekeln an die kalte Wand geraten und mit dem Konvektionsstrom absinken. Um wirksame Trennungen zu bekommen, muß eine solche Anordnung eine im Verhältnis zum Durchmesser große Länge haben, so daß Trennrohranlagen Höhen von 20 bis 80 Metern aufweisen, die aber bequem in mehrere Meter langen Abschnitten nebeneinander ins Laboratorium gestellt werden können (Abb. 3). Damit lassen sich manche Isotope in einer Reinheit von über 99% darstellen. Bereits 1938 wurden so erstmalig die Chlorisotope  $^{35}\text{Cl}$  und  $^{37}\text{Cl}$  bezwungen und später schwerer Sauerstoff  $^{18}\text{O}$ , Stickstoff  $^{15}\text{N}$ , die zwei Kryptonisotope  $^{84}\text{Kr}$  und  $^{86}\text{Kr}$  sowie die Neonisotope  $^{20}\text{Ne}$  und  $^{22}\text{Ne}$  in größerer Menge rein erhalten. Als ein Vorzug des Verfahrens muß erwähnt werden, daß es im Gegensatz zu den vorgenannten kaum eine Wartung verlangt und so kleine Apparaturen bedingt, daß ein chemisches Institut sich die für seine Untersuchungen notwendigen Isotope laufend selbst anreichern kann.

Ausgezeichnete Erfolge wurden auch durch die *Diffusion* von Gasen erzielt. Wegen des Satzes von der Gleichverteilung der Energie besitzen

die leichten und schweren Molekeln im Mittel dieselbe kinetische Energie; d. h. aber, daß die schweren Molekeln sich durchschnittlich etwas langsamer als die leichten bewegen. Diesen Umstand kann man ausnutzen, wenn man das Gas durch eine poröse Membran diffundieren läßt, wobei die leichten Molekeln etwas schneller durchtreten und die schweren bevorzugt zurückbleiben. Zuerst hat G. HERTZ 1932 nach diesem Prinzip unter Einführung des Gegenstromprinzips die Neon- und später auch die Wasserstoffisotope in kleinen Mengen rein gewonnen. Andere haben die Isotope von Argon, Kohlenstoff und Sauerstoff erheblich anreichern

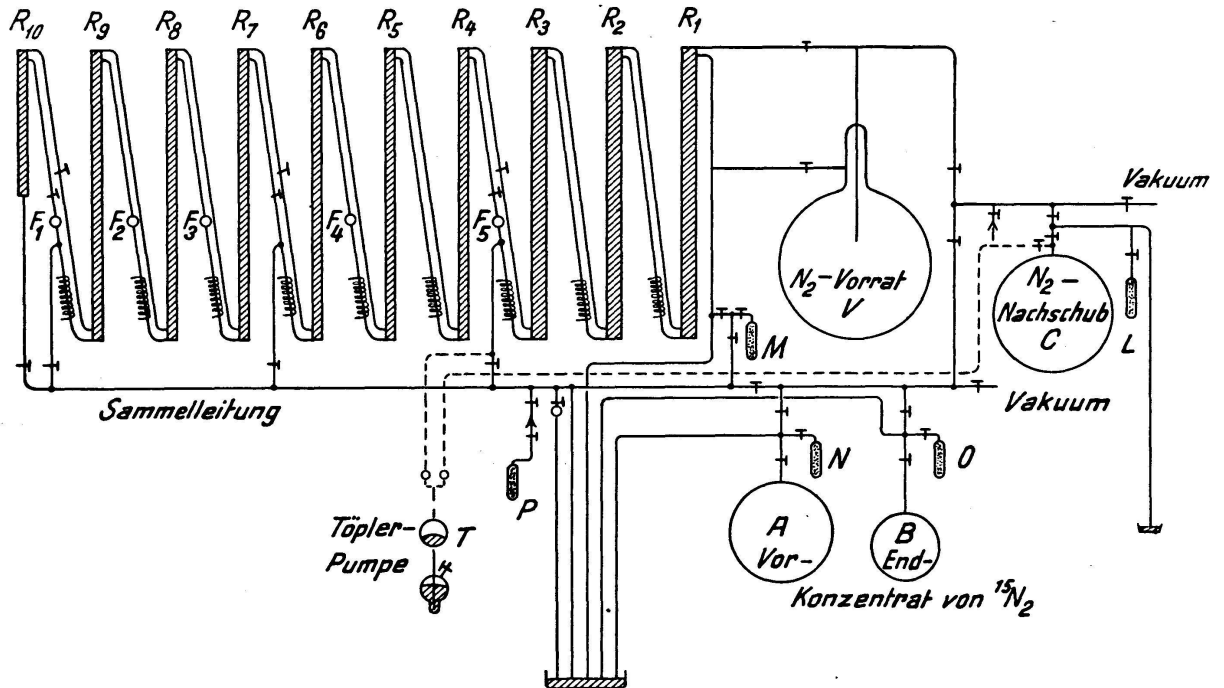


Abb. 3

Trennrohranlage des schweren Stickstoffisotops zur Reindarstellung von  $^{15}\text{N}$   
(nach Clusius)

können. Eine hauptsächliche Schwierigkeit besteht in der Verwendung geeigneter poröser Membranen, die nicht von eigentlichen Löchern, sondern nur von sehr feinen, möglichst engen Kanälen gleichmäßigen Durchmessers durchsetzt sein sollen. Die ursprünglich verwendeten keramischen Massen sind später durch dünne Metallbleche ersetzt worden. Weiter war die Entwicklung von korrosionsfesten Spezialpumpen notwendig, um das Gas im Umlauf zu halten. In Los Alamos wurden zur Abtrennung des leichten Uranisotops  $^{235}\text{U}$  mit Uranhexafluorid als Trenngas viele Tausende solcher Pumpen und der dazu gehörigen Diffusionsdiaphragmen aufgestellt. Die betreffende Fabrik ist nicht nur die größte je gebaute Isotopentrennanlage, sondern die größte je gebaute Fabrik überhaupt. Eine Vorstellung von den Ausmaßen der Trennvorrichtung vermittelt die Angabe, daß eine einzelne Molekel in der Trenn-

anlage im Durchschnitt einen Weg von 20 000 km, d. h. den halben Erdumfang, zurücklegt, ehe sie das Rohgewirr wieder verläßt. Auch mengenmäßig steht diese Fabrik an der Spitze aller Isotopenapparaturen, da das nur zu 0,7% in der Natur vorkommende Uranisotop kilogrammweise gewonnen wird. Über die Reinheit des Endproduktes sind begreiflicherweise keine Angaben bekanntgeworden.

Zur Messung des Häufigkeitsverhältnisses der inaktiven Isotope kann jede massenabhängige Eigenschaft der Molekel wie die Lage einzelner Linien und Banden im Spektrum, die Dichte der Substanz, ihre

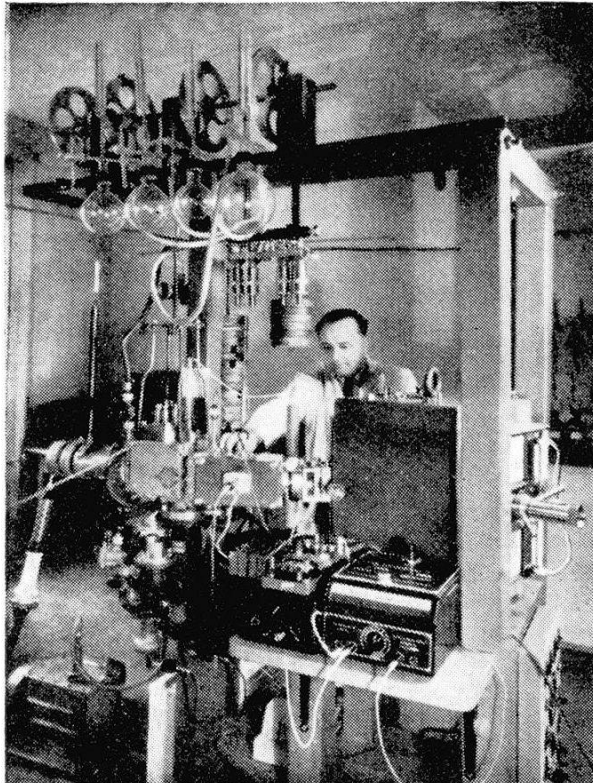


Abb. 4

Massenspektrometer (nach Mattauch) im Theodor-Kocher-Institut zu Bern

Wärmeleitfähigkeit als Gas oder Dampf und ähnliches mehr herangezogen werden. Am besten benutzt man aber den *Massenspektrographen*, bei dem die optischen Prismen und Linsen des üblichen Spektrographen durch geeignete magnetische und elektrische Felder ersetzt sind (Abb. 4). Genau wie ein Lichtstrahl im optischen Spektrographen zu einem farbigen Spektralband auseinandergezogen wird, so zerfällt hier ein Strahlenbündel von Ionen, d. h. elektrischen Teilchen verschiedener Masse in ein Massenspektrum seiner einzelnen Bestandteile. Dieses kann entweder unmittelbar auf einer photographischen Platte sichtbar gemacht oder auch mit einem Auffänger für die einzelnen Ionensorten elektrisch abgetastet werden. Dank der modernen Verstärkertechnik sind so Häufigkeitsvergleiche der einzelnen Isotope mit kleinsten Substanzen recht



bequem durchführbar. Im Prinzip ist jedes Massenspektrometer zugleich ein ideales Instrument zur Isotopentrennung, da es mit einem Schritt reine Endprodukte liefert. Leider sind jedoch die mit den üblichen Instrumenten erhältlichen Mengen nur äußerst gering und für experimentelle Zwecke viel zu klein. Durch Ausbildung geeigneter Ionenquellen und Verwendung ausgedehnter magnetischer Felder hat man aber gelernt, manche begehrten Isotope zunächst in Mengen von  $\gamma$  und schließlich von Milligrammen zu gewinnen. Auch hier hat der Wunsch, das Uranisotop  $^{235}\text{U}$  möglichst rein darzustellen, beflügelnd gewirkt. In derartigen riesigen elektromagnetischen Separatoren, von den Amerikanern Calutrons genannt, werden außer den Uranisotopen noch etwa 100 verschiedene Atomarten in einer Reinheit von 90% oder besser abgeschieden. Es ist wichtig, daß es sich dabei meist um Metalle (z. B. Li, Mg, K, Ca, Ti, Fe, Ni, Cu, Zn, Ge, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Te, W, Tl, Pb) handelt, für die alle vorher genannten Verfahren nur schlecht anwendbar sind. Die elektromagnetische Trennung bietet also eine willkommene Ergänzung der für Gase und Flüssigkeiten gebräuchlichen Methoden.

Außerdem gibt es noch andere Möglichkeiten zur Isotopentrennung, wie z. B. die Benützung von photochemischen und reaktionskinetischen Eigenschaften der Molekeln, die wir hier übergehen. Man kann sagen, daß wohl kaum eine massenabhängige Eigenschaft der Materie existiert, die man nicht in irgendeiner Form mit mehr oder weniger Glück für den gedachten Zweck hat heranziehen wollen.

### Künstlich radioaktive Isotope

Haben schon die natürlich vorkommenden Isotope der Elemente große Bedeutung erlangt, so gilt dies für ihre radioaktiven Geschwister erst recht. Nachdem im Jahre 1932 JOLIOT und CURIE die künstliche Radioaktivität entdeckt hatten, setzte geradezu explosionsartig eine großartige Entwicklung ein, in deren Verlauf man nicht nur sämtliche bekannten Elemente in radioaktiver Form kennenlernte, sondern sogar Isotope von Elementen künstlich herstellte, die im periodischen System noch fehlten. Die 4 Lücken unter dem Mangan, Jod, Cäsium und zwischen den Elementen Neodym und Samarium wurden so durch die künstlich radioaktiven Elemente Technetium (Tc), Astacin (At), Francium (Fr) und die namenlose Nr. 61 ausgefüllt. Dadurch wurde das chemische Studium dieser in der Natur fehlenden Atomsorten möglich. Daß solche Lücken im periodischen System auftreten, ist nach unserer heutigen Kenntnis vom Wesen des Atomkerns nicht mehr überraschend; eher wird man sich darüber wundern, daß sie nicht häufiger sind und daß in der Natur überhaupt so viele verschiedene Atomsorten noch angetroffen werden. Tatsächlich kennen wir im periodischen System eine ganze Reihe von Stellen, die durch instabile Isotope besetzt sind. So das  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{176}\text{Lu}$ ,  $^{187}\text{Re}$ , die als  $\beta$ -Strahler langsam unter Elektronenemission zerfallen, sowie eines der Samariumisotope, das Heliumkerne aussendet, also ein  $\alpha$ -Strahler ist. Man muß mit Sicherheit erwarten,



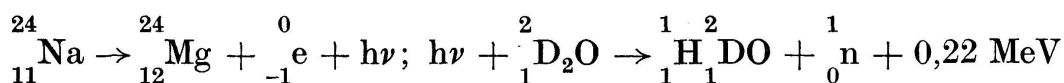
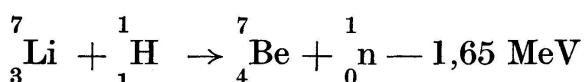
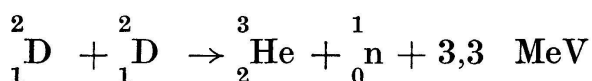
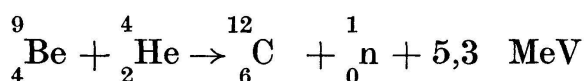
daß wir in dem Maße noch mehr instabile Atomsorten finden werden, wie sich unsere technischen Hilfsmittel verfeinern. In einzelnen Fällen kann man sogar angeben, wo man zu suchen hat. Diese durchweg sehr schwachen Radioaktivitäten sind ein letztes Wetterleuchten des einige Jahrmilliarden zurückliegenden Urgewitters, von dem die Schöpfung der chemischen Elemente begleitet wurde. Die heute leeren Plätze des periodischen Systems waren in kosmologisch entfernt liegenden Zeiten auch einmal besetzt, aber diese Elemente sind inzwischen durch radioaktive Umwandlungen ausgestorben, so daß wir sie in der Erdkruste nicht mehr antreffen.

Die Instabilität der Atomkerne nimmt mit steigender Masse und Ordnungszahl wesentlich zu, wie schon daraus erhellt, daß es oberhalb vom Wismut mit der Ordnungszahl 83 keine stabilen Isotope mehr gibt, worauf das periodische System beim Uran mit der Ordnungszahl 92 überhaupt abreißt. Daß die Radioaktivität auf verhältnismäßig breiter Basis seinerzeit erforscht und in wesentlichen Zügen schon vor der Entdeckung der künstlichen Radioaktivität klargestellt werden konnte, liegt einzig und allein daran, daß Thorium und Uran sehr langlebige Isotope haben. Diese schweren, dem Zerfall ausgesetzten Elemente sind daher der Forschung ebenso zugänglich wie stabile. Alle Bemühungen, Elemente noch höherer Ordnungszahl und Masse in der Natur aufzufinden, haben jedoch zu keinem greifbaren Ergebnis geführt. Von größtem Interesse ist es daher, daß man die Isotope von 4 oder 5 derartigen Transuranen wieder hat aufbauen können. Es sind dies die Metalle Neptunium (93), Plutonium (94), Americium (95), Curium (96) und Berkelium (97). Eines von ihnen, das Plutonium mit der Masse 239, wird sogar kilogrammweise gewonnen; es mutet mit einer Lebensdauer von 24 000 Jahren an menschlichen Verhältnissen gemessen recht stabil an und besitzt für Kernmaschinen und Atombomben große Bedeutung. Durch die Nachahmung der Schöpfung aller dieser instabilen Elemente ist der Physiker jedenfalls in einer glücklicheren Lage als sein paläontologischer Kollege, der leider keinem ausgestorbenen Tier mehr zu leiblichem Leben verhelfen kann.

Wie erhält man nun radioaktive Isotope? Wir haben zwei Möglichkeiten. Die eine, ältere, läuft immer darauf hinaus, daß man die Atomkerne mit Teilchen leichter Masse beschießt. So benutzt man positiv geladene Korpuskeln, Protonen, Deutonen und  $\alpha$ -Teilchen, die man als Kerne der Wasserstoff- und Heliumisotope durch Ionisierung dieser Elemente bequem erhält. In jedem Fall müssen die Teilchen stark beschleunigt werden, so daß sie eine große Energie mitbekommen. Dann können sie die abstoßenden, positiven Kernfelder überwinden und in den Kern wirklich eindringen. Dazu läßt man die Ionen ein Potentialgefälle von einigen Millionen Volt durchfallen, ehe man sie als Projektile verwendet. Mit dieser Notwendigkeit hängt die Ausbildung der modernen Hochspannungstechnik zusammen, die in elektrostatischen Beschleunigern, im Zyclotron, im Synchrozyclotron und ähnlichen Maschinen uns Teilchen bis zu 200 Millionen Volt Geschwindigkeit herauf

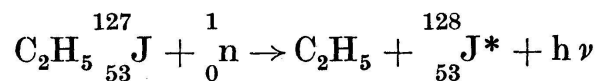
verschafft. Das Verfahren ist um so schwieriger durchzuführen, je schwerer die Elemente werden, da in dieser Richtung die abstoßenden Kernkräfte wegen der zunehmenden Ordnungszahl gleichfalls zunehmen.

Frei von dieser Beschränkung ist ein auf den italienischen Physiker FERMI zurückgehendes Verfahren, das Neutronen als Geschosse benützt. Da jeder Atomkern Protonen neben Neutronen enthält und da zwischen den Protonen wegen ihrer gleichsinnigen elektrischen Ladung bestimmt große abstoßende Coulomb-Kräfte herrschen, muß man annehmen, daß starke anziehende Kräfte zwischen Protonen und Neutronen und wohl auch zwischen den Neutronen unter sich wirken, die überhaupt erst den Zusammenhalt des Kernes ermöglichen. Diese Austauschkräfte sind von allen bekannten Kräften ihrem Wesen nach verschieden, und ihre Aufklärung steht im Mittelpunkt des derzeitigen Interesses der Kernforschung. Nun wirken diese anziehenden Kräfte zwischen Neutron und positivem Atomkern schon auf größere Entfernung, so daß Neutronen auch von schweren Kernen leicht aufgenommen werden, weil sie kein abstoßendes Coulomb-Potential durchlaufen müssen. Es ist sogar so, daß Neutronen, die bis auf die Geschwindigkeit der Gasmoleküle abgebremst sind, sogenannte thermische Neutronen, von vielen Atomen besonders gut eingefangen werden, zum Teil weil sie sich wegen ihrer kleinen Geschwindigkeit länger in Kernnähe aufhalten. Man kennt verschiedene geeignete Neutronenquellen. Sie entstehen bei der Bestrahlung von Beryllium mit  $\alpha$ -Teilchen, beim Beschuß von schwerem Wasser mit Deutonen, von Lithium mit Protonen, schließlich auch beim Kernphotoeffekt durch Absorption von  $\gamma$ -Strahlung in Atomkernen:



Dringt nun ein Teilchen in den Atomkern ein, so findet eine Kernreaktion statt. Dabei werden je nachdem  $\alpha$ -Teilchen, Deutonen, Protonen, Neutronen und auch  $\gamma$ -Strahlungen emittiert. Der zurückbleibende Kern ist meistens vom ursprünglich beschossenen verschieden und radioaktiv. Er geht durch Emission von Elektronen oder Positronen wieder in einen stabilen Kern über. Die Abtrennung des radioaktiven Isotops macht nur geringe Schwierigkeiten, da es infolge der zwischengeschalteten Kernreaktion im allgemeinen chemisch von dem bestrahlten Mutterelement verschieden ist. Ist es chemisch identisch, so sind gleichwohl gelegentlich Trennungen möglich, wie SZILARD und CHALMERS ge-

zeigt haben. Bestrahlt man Äthyljodid mit Neutronen, so wird aus  $^{127}\text{J}$  das Atom  $^{128}\text{J}$  gebildet, dessen Kern zunächst im angeregten Zustand anfällt und sich durch Emission eines  $\gamma$ -Quants stabilisiert:



Das gesternte, radioaktive Jodisotop wird dabei durch Rückstoß aus der organischen Verbindung herausgerissen und kann von ihr durch Ausschütteln mit Wasser abgetrennt werden.

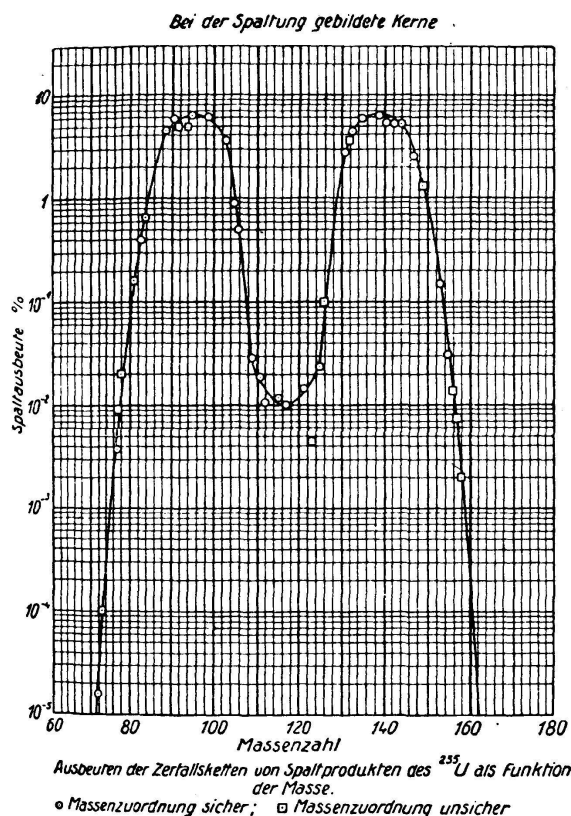


Abb. 5  
Unsymmetrie der Spaltungskurve  
des Uranisotops  $^{235}_{92}\text{U}$

Die zweite Möglichkeit zur Gewinnung radioaktiver Isotope geht auf die von HAHN und STRASSMANN Ende 1938 entdeckte Spaltung des Urankerns zurück. Bis dahin brachten alle radioaktiven Prozesse in dem betroffenen Atomkern nur eine verhältnismäßig geringe Änderung mit sich. Bei einem  $\alpha$ -Prozeß änderten sich Masse und Ladung noch am meisten, und doch nahm dabei die Masse nur um 4 und die Kernladung nur um 2 Einheiten ab. HAHN und STRASSMANN entdeckten aber, daß der

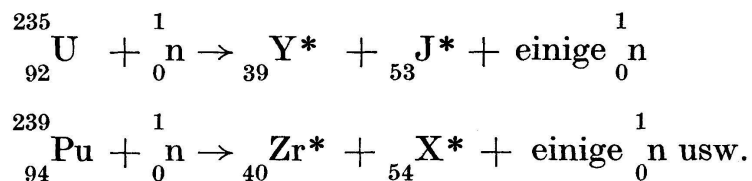
Urankern, genauer der Kern von  $^{235}_{92}\text{U}$ , bei der Bestrahlung mit langsamen Neutronen auseinanderbricht. Die Bruchstücke sind ungefähr, aber nicht genau gleich schwer; sie gruppieren sich vorzugsweise um die Massen von Brom bis Ruthenium einerseits und Jod bis Neodym andererseits (Abb. 5). Die Tatsache, daß der Urankern lieber in zwei etwas ungleiche Massen als in symmetrische Hälften zerspringt, deutet darauf

hin, daß er selbst nicht genau kugelig, sondern eher länglich gebaut ist. Beim Einfang des Neutrons gerät der ganze Kern wie ein Flüssigkeitstropfen in Schwingungen, und das längliche Gebilde stabilisiert sich dadurch, daß es einen Teil abschnürt. Wir beobachten ähnliches an einem freifallenden, dünnen Flüssigkeitsstrahl, der meist nicht in gleich große, sondern öfter abwechselnd in größere und kleinere Tröpfchen zerfällt. Analog lassen sich bei der Kernspaltung noch so leichte Elemente wie Zink und so schwere wie Europium nachweisen, die durchaus primär entstanden sind. Der Spaltprozeß selbst ist nicht auf  $^{235}_{92}\text{U}$  beschränkt;

auch Plutonium,  $^{239}_{94}\text{Pu}$ , zeigt ihn, und Neutronen geeigneter Energie erzwingen ihn noch bei anderen Elementen, wie Thorium, Wismut, ja sogar noch beim Wolfram und Tantal.

Wie eingangs erwähnt, weisen die schweren Elemente zunehmend einen Neutronenüberschuß auf, der beim Uran seinen größten Wert erreicht. Die Neutronen werden eben als Kitt gebraucht, um die schweren Kerne mit den vielen auseinanderstrebenden Protonen zusammenzuhalten. Die Bruchstücke eines Urankerns bewahren zunächst diesen Neutronenüberschuß, so daß sie selbst instabil sind. Tatsächlich gehen sie vorwiegend durch  $\beta$ -Strahlung in Elemente höherer Ordnungszahl über, wodurch wir bei der Uranspaltung eine große Auswahl an radioaktiven Isotopen erhalten.

Wegen des Neutronenüberschusses werden bei der Spaltung auch Neutronen als Nebenprodukt in Freiheit gesetzt. Als typische Spaltprozesse können daher folgende Beispiele gelten:

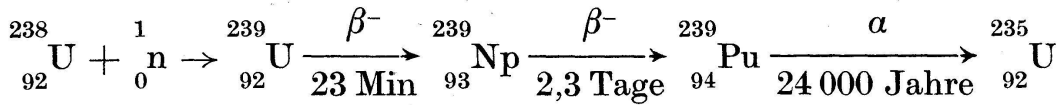


Hier drängt sich der Gedanke auf, diese Neutronen zur Spaltung neuer Urankerne zu benutzen. Dann werden wieder Neutronen frei, die wieder spalten usf. Man kennt den Typ solcher Reaktionen schon lange in der Chemie, z. B. bei Verbrennungen und Explosionen, und faßt sie unter dem Namen von Kettenreaktionen zusammen. In einem Stück Uran kann jedoch eine Kettenreaktion durch Neutronen nicht ohne weiteres ausgelöst werden, da dem zwei Hindernisse entgegenstehen.

Das eine liegt darin, daß gewöhnliches Uran nur 0,7%  $^{235}_{92}\text{U}$  enthält, während die Hauptmasse das Isotop  $^{238}_{92}\text{U}$  bildet, wenn wir von einer

kleinen Menge  $^{234}_{92}\text{U}$  absehen, die hier keine Rolle spielt. Dieses schwere Isotop fängt nun die schnellen Spaltungsneutronen weg und geht in

$^{239}_{92}\text{U}$  über, das sich durch 2maligen  $\beta$ -Zerfall über Neptunium in Plutonium verwandelt:



Die Spaltungsneutronen werden also verbraucht, ehe sie wieder auf  $^{235}_{92}\text{U}$  treffen. Der zweite Grund ist darin zu sehen, daß  $^{235}_{92}\text{U}$  nur von lang-

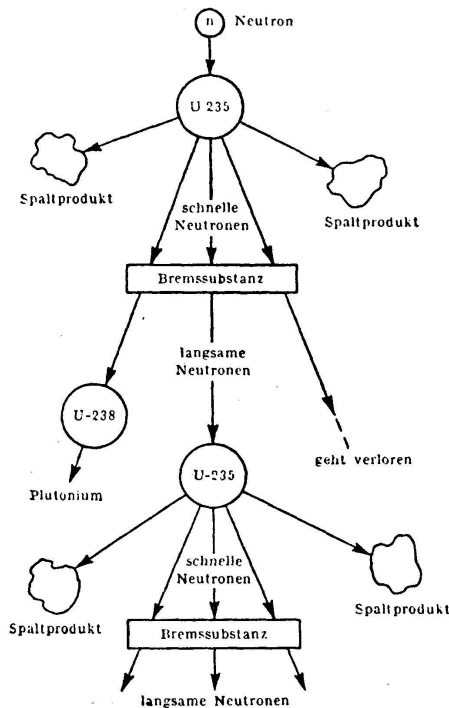


Abb. 6  
Gesteuerter Kernspaltungsprozeß  
(nach Hahn)

samen Neutronen gut gespalten wird, während die schnellen nicht so wirksam sind. Gelingt es also, die schnellen Spaltungs-Neutronen abzu-

bremsen, ehe sie mit  $^{238}_{92}\text{U}$  abreagieren, so steigt die Chance, daß die

langsamen Neutronen dem  $^{235}_{92}\text{U}$  zugute kommen. Infolgedessen wird man eine Kettenreaktion nicht etwa dann erhalten, wenn man eine möglichst große Menge Uranmetall einfach anhäuft, sondern wenn man es in einer Substanz räumlich verteilt, die die Neutronen abbremst, ohne sie wegzufangen (Abb. 6). Solche Bremsstoffsubstanzen sind das schwere Wasser und hochgereinigter Graphit, an deren Kernen die Neutronen beim wiederholten Stoß ihre Energie einbüßen, bis sie thermische Geschwindigkeit haben.

Eine Kernmaschine, Pile oder Meiler genannt, besteht also aus einem Graphitklotz von einigen 100 Tonnen Gewicht, in dem Höhlungen

ausgespart sind, die mit Uranstäben beschickt werden. Um das ganze gefahrlos aufbauen und später die Reaktion steuern zu können, sind in besonderen Kanälen der Bremssubstanz cadmierte Stahlstangen vorgesehen. Das Cadmiumisotop  $^{113}_{48}\text{Cd}$  frißt die Neutronen sehr leicht weg, so daß eine Kernmaschine erst dann in Gang kommt, wenn die Steuerstangen ganz oder teilweise herausgezogen sind (Abb. 7). Die Strahlung einer solchen mittelgroßen Uran-Pile entspricht der radioaktiven Leistung von  $10^4$  bis  $10^5$  Zyclotrons und einer thermischen Leistung von ein paar 1000 Kilowatt, so daß man sich durch dicke Betonpanzer, Fernbedienung

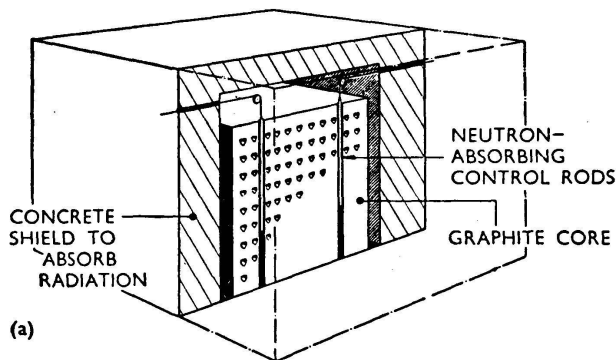
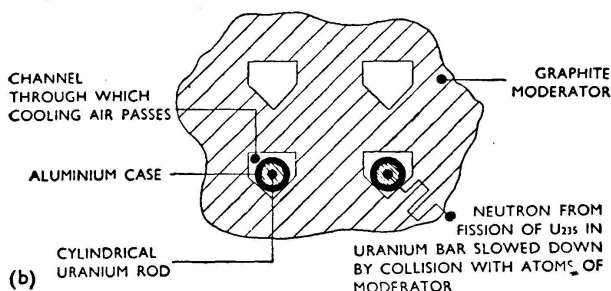


Abb. 7  
Schema einer Uranpile  
(nach Cockroft)



und andere Maßnahmen vor der Strahlenwirkung schützen muß. In dem Panzer sind an passender Stelle Löcher ausgespart, durch die man zu bestrahlende Substanzen in den Uranmeiler hineinschieben kann. Die Neutronendichte ist im Innern des Klotzes am größten und nimmt nach außen hin ab. Mit diesem mächtigen Hilfsmittel werden heute in den Vereinigten Staaten, Canada, England und Frankreich die radioaktiven Isotope vieler Elemente laufend dargestellt, so daß sie teilweise käuflich erworben werden können. Von  $^{14}_6\text{C}$  und  $^{35}_{16}\text{S}$  sind z. B. etwa je 20 Verbindungen erhältlich, die sich für organische Synthesen besonders eignen. Der Preis der englischen Produkte liegt zwischen 20 und 60 £ für ein Milligramm Radiumäquivalent.

### Einige Anwendungen von Isotopen

Stabile Isotope haben den Vorzug, daß man auch schwieriger zugängliche Verbindungen in aller Ruhe synthetisieren kann; diese Verbindungen sind dann beliebig lange haltbar, jede Strahlenschädigung im



Organismus fällt mit Sicherheit weg, und die Versuchsreihen lassen sich über große Zeiträume ausdehnen. Auf der anderen Seite ist der Verdünnungsgrad, bis zu dem stabile Isotope nachweisbar bleiben, um viele Zehnerpotenzen geringer als bei radioaktiven Isotopen, deren Nachweis sich zudem mit Zählrohren und Verstärkern recht bequem gestaltet. Freilich haben nicht alle Elemente radioaktive Vertreter geeigneter Lebensdauer. Beim Stickstoff ist man z. B. durchaus auf sein stabiles schweres Isotop angewiesen, da seine radioaktiven Atomsorten eine für die üblichen Versuche viel zu kurze Lebensdauer haben.

Die Anwendung der Isotopentechnik ist so umfangreich geworden, daß man mir gestatten möge, anstelle einer ermüdenden Aufzählung einige typische Beispiele herauszugreifen.

Eines der ältesten Probleme der Radiochemie war die Ermittlung des Alters des Gesteinsmantels der Erde. Uran zerfällt unter Heliumabgabe über verschiedene radioaktive Zwischenelemente schließlich in stabiles Blei. Kennt man die mittlere Zeit für das Durchlaufen dieser Zerfallsreihe, so läßt sich aus dem Verhältnis von noch vorhandenem Uran zu dem in geologischer Zeit gebildeten Blei die verstrichene Zeit seit der Entstehung des Minerals berechnen. Man findet recht übereinstimmend ein Alter von 2000 Millionen Jahren für das Urgestein. Diese ältere Methode ist in glücklicher Weise neuerdings durch das Strontiumverfahren von HAHN ergänzt worden, bei dem die Nachbildung des

Strontiumisotops  $^{87}_{38}\text{Sr}$  aus dem Rubidiumisotop  $^{87}_{37}\text{Rb}$  durch  $\beta$ -Zerfall benutzt wird. Auch hier muß das Verhältnis von Rubidium zu Strontium analytisch genau bestimmt und die Häufigkeit des nachgebildeten Isotops  $^{87}_{38}\text{Sr}$  mit derjenigen in gewöhnlichem Strontium verglichen werden.

Für den Geologen ist es wichtig, daß dieses Verfahren auf Sedimente anwendbar ist, für die die Uran-Blei-Methode wegfällt. Sogar zu Altersbestimmungen in geschichtlicher Zeit lassen sich radioaktive Verfahren heranziehen. Unter dem Einfluß der Höhenstrahlen entstehen in der höchsten Atmosphäre Neutronen, die den Stickstoff  $^{14}_7\text{N}$  unter Emission

eines Protons in radioaktiven Kohlenstoff  $^{14}_6\text{C}$  umwandeln. Dieser Kohlenstoff gelangt als Kohlendioxyd bis in die Troposphäre und wird schließlich von der lebenden Pflanze aufgenommen. Jedes Stück Holz ist infolgedessen schwach radioaktiv. Der Einbau von Kohlendioxyd hört auf, wenn der Baum abstirbt oder umgehauen wird. Da radioak-

tiver Kohlenstoff  $^{14}_6\text{C}$  eine Halbwertszeit von  $5568 \pm 30$  Jahren besitzt, wird ein Stück Holz dieses Alters nur halb so radioaktiv sein wie eine in unserer Zeit gewachsene Pflanze. Dies kann man dazu benutzen, um mit einem hölzernen Gegenstand aus einem Pharaonengrab die zeitliche Datierung der Archäologen zu überprüfen. Glücklicherweise hat radioaktiver Kohlenstoff gerade eine Lebensdauer, die ihn für die uns noch nahe-



liegenden geschichtlichen Zeiten, aus denen in vielen Fällen sichere Überlieferungen fehlen, geeignet macht.

Vorhin wurde ausgeführt, daß bei den leichten Elementen, wie z. B. Sauerstoff, die Lage chemischer Gleichgewichte für die Isotope sich etwas unterscheidet. Nun werden diese Gleichgewichte durch die Temperatur beeinflußt. Bildet sich ein Kalksediment, so wird in dem entstehenden Kalziumkarbonat das Isotopenverhältnis des Sauerstoffs ein wenig anders sein, wenn sich das Sediment bei 15°, als wenn es sich bei 25° C gebildet hat. UREY hat ein spezielles Massenspektrometer zur genauen Häufigkeitsbestimmung der Sauerstoffisotope entwickelt. Mit ihm konnte er nach passender Eichung rückwärts die Temperatur bestimmen, die auf unserem Planeten vor Jahrmillionen in den Meeren herrschte, aus denen die Sedimente ausgefallen sind. Es ergaben sich mit diesem eigenartigen, geologischen Thermometer im Durchschnitt Temperaturen, die denen unserer heutigen tropischen und subtropischen Meere entsprechen.

Meßtechnische Verwendung hat das Quecksilberisotop <sup>198</sup>Hg bekommen. Bestrahlt man ein Goldblech mit Neutronen, so wird aus dem

<sup>197</sup><sub>79</sub>Au zunächst radioaktives Gold <sup>198</sup><sub>79</sub>Au gebildet, das als β-Strahler

in <sup>198</sup><sub>80</sub>Hg zerfällt. Durch Erhitzen des Goldblechs läßt sich das Quecksilber austreiben und in eine Lampe füllen, die dann das Licht eines reinen Isotops in scharfen Spektrallinien ausstrahlt; alle Feinstruktur ist beseitigt und nur noch die Druck- und Temperaturverbreiterung der Linien übriggeblieben. Letztere kann man mit anderen reinen Isotopen,

wie <sup>86</sup>Kr und <sup>136</sup>X, die in mit flüssiger Luft gekühlten Spektralrohren verwendet werden, noch weiter einschränken. Auf diese Weise wird das Urmeter aus Platin-Iridium, das als mechanischer Maßstab heutigen meßtechnischen Anforderungen ohnehin nicht mehr genügt, unmittelbar in Wellenlängen ausgedrückt. MICHELSON hatte diesen Vergleich nur unvollkommen mit der roten Cadmiumlinie durchgeführt, die aber bei der komplexen Zusammensetzung des Cadmiums, das aus 8 Isotopen besteht, wegen ihrer Hyperfeinstruktur dafür prinzipiell ungeeignet ist.

Durch Verabreichung von radioaktiven Eisenpräparaten kann man die roten Blutkörperchen einer Versuchsperson radioaktiv machen. Spritzt man derartiges Blut bekannter Aktivität einem anderen Menschen in die Blutbahn ein und entnimmt man ihm nach kurzer Zeit ein bestimmtes Quantum Blut, so läßt sich aus der Verdünnung der Aktivität sofort die kreisende Blutmenge genau angeben, ein Verfahren, das zur Beurteilung der nötigen Blutmenge bei Transfusionen herangezogen wird. Mit radioaktivem Phosphor ist die Geschwindigkeit des Stoffwechsels in verschiedenen Organen, auch in den Knochen, Zähnen und der Nervensubstanz, genau verfolgt worden. Die Funktion der Schilddrüse kann mit radioaktiven Jodpräparaten kontrolliert, die Durchlässigkeit der Magen- und Darmwände mit radioaktivem Natrium, das man als Kochsalzlösung einnimmt, untersucht werden.

Die Anwendungen in der Chemie sind Legion und müssen übergangen werden. Hat man doch sogar mit Hilfe der inaktiven H-, C-, O- und N-Isotope Schnellverfahren zur organischen Verbrennungsanalyse entwickelt. Technisches Interesse bietet die Untersuchung der Schmiermittelwirkung von Ölen in Lagerschalen. Der Transport unsichtbarer, auch mikroskopisch nicht erkennbarer Metallspuren war lange von den Metallurgen vermutet worden, konnte aber erst jetzt durch radioaktive Isotope bewiesen werden.

Ein Uranmeiler produziert neben den radioaktiven Isotopen und Neutronen noch eine große Wärmemenge, die letzten Endes davon her-

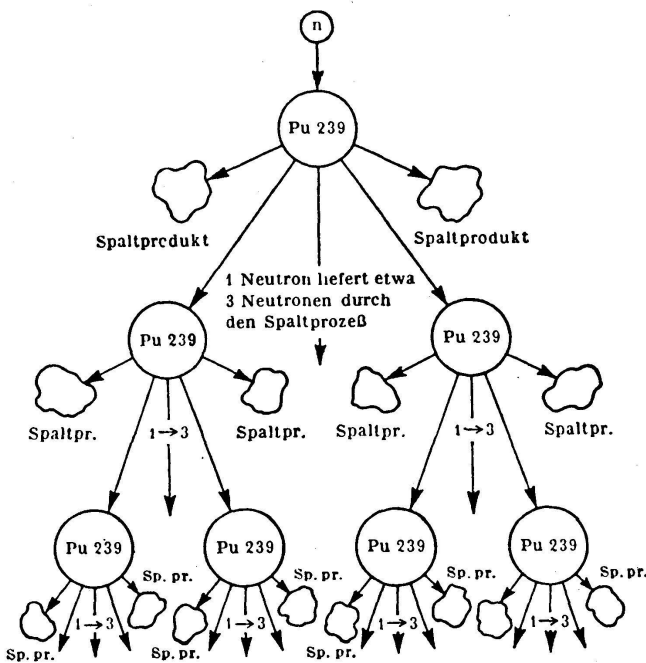


Abb. 8  
Explosive Kernkettenreaktion  
(nach Hahn)

rührt, daß beim Zerfall ein Teil der Uranmasse verschwindet und als Energie wieder zum Vorschein kommt. Da der Umwertungsfaktor das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit enthält, entspricht einem kleinen Massenschwund eine gewaltige Energiemenge. Die Temperatur des Meilers muß deshalb durch eine Luft- oder Wasserkühlung sorgsam regu-

liert werden. Der Zerfall von 1 kg  $^{235}_{92}\text{U}$  bzw.  $^{239}_{94}\text{Pu}$  liefert rund denselben Heizwert wie die Verbrennung von 2500 Tonnen Kohle. Daraus ersieht man, daß beide Isotope Sprengstoffe von ungeheurer Wirkung darstellen, wenn man die beim Zerfall entstehende Energie in kurzer Zeit, etwa Bruchteilen von Sekunden, in Freiheit setzt. Dazu darf man die Kettenreaktion nicht mäßigen und lenken, sondern muß sie sozusagen «durchgehen» lassen (Abb. 8). Dies ist möglich, wenn man das  $^{235}_{92}\text{U}$  von seinem schwereren Begleiter abtrennt, so daß der Einfangsprozeß für Neutronen durch das schwere Isotop wegfällt. Oder man trennt das in der Pile gebildete Plutonium von den übrigen Spaltprodukten und dem unverän-

derten Uran chemisch ab. Ein kleines kugelförmiges Stück dieser reinen Isotope ist harmlos, da seine Oberfläche im Verhältnis zum Volumen um so größer ist, je kleiner wir die Kugel machen. Infolgedessen können aus einem kleinen Stück  $^{235}_{92}\text{U}$  bzw.  $^{239}_{94}\text{Pu}$  die Spaltungsneutronen durch die Oberfläche wegdiffundieren, ehe sie im Innern neue Spaltungen auslösen. Macht man die Kugel aber größer, so wird das Volumen mit der 3. Potenz des Radius, die Oberfläche aber nur mit seiner 2. Potenz zunehmen. Schließlich erreicht die Kugel eine kritische Größe, bei der gerade ebenso viele Neutronen entstehen wie durch die Oberfläche abströmen. Jetzt ist das System labil, und jede weitere Vergrößerung muß zu einem rapiden Anwachsen der Spaltungen, d. h. zur Kettenverzweigung und zu einem explosionsartigen Umsatz der Kernenergie führen. Die kritische Menge beträgt etwa 10–20 kg, und da die Dichte dieser metallischen Isotope um 20 herum liegt, stellt ein Raum von etwa 1 Liter das ursprüngliche Reaktionsvolumen einer im Umkreis von vielen Kilometern wirksamen Atombombe dar. Halbiert man diese Menge, so liegen die getrennten Hälften unter dem kritischen Volumen und können verhältnismäßig gefahrlos gehandhabt werden. Vereint man sie aber schnell, etwa indem man das eine Stück als Geschloß in einem allseitig geschlossenen Geschützrohr in die andere Hälfte hineinschießt, so findet der ungesteuerte Kettenprozeß und die Explosion statt.

Ich hielt es für richtig, diese wenig tröstliche Anwendung spezieller Isotope hier doch zu erwähnen und sie nicht zu unterdrücken, obwohl von einer Verwendung in der Forschung wirklich nicht mehr gesprochen werden kann. Sie hängt als Drohung über der Welt und hat die von der großen Menge sonst wenig beachtete Arbeit des Gelehrten ins Blickfeld der Öffentlichkeit gerückt.

Zu allen Zeiten, besonders aber wenn die Geister gären, alte Vorstellungen zu Grabe getragen werden sollen und neue Erkenntnisse sich Bahn brechen wollen, stößt der Naturwissenschaftler auf den kritischen Widerspruch seiner Zeitgenossen. Dann erhebt der fachfremde Moralist warnend seinen Finger und erinnert daran, daß es der Verführer Mephisto war, der dem Scholaren ins Stammbuch schrieb: «Eritis sicut deus, scientes bonum et malum.» Wenn nun heute dem ewigen Schüler Mensch angesichts der Entfesselung dämonisch anmutender Kräfte vor seiner Gottähnlichkeit wirklich bange wird, so hat er doch nicht den mindesten Grund, ausgerechnet die Naturforschung anzuklagen. Gut und Böse liegen nicht in ihr, sondern in des Menschen eigener Brust beschlossen. Die Naturwissenschaft hat ein volles Recht, den an sie gerichteten Vorwurf mit dem Hinweis auf jenen anderen «sonderbaren, aber ungeheuren» Spruch abzutun: «Nemo contra deum nisi deus ipse!»