Zeitschrift: Bulletin der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften = Bulletin de l'Académie suisse des sciences médicales = Bollettino dell' Accademia svizzera delle scienze mediche

Herausgeber: Schweizerische Akademie der Medizinischen Wissenschaften

Band: 5 (1949)

Heft: 5-6: Introduction à l'étude d'isotopes utilisés en biologie, clinique et thérapeutique : travaux édités par la Commission des Isotopes de l'Académie Suisse des Sciences Médicales = Einführung in die Anwendung der Isotopentechnik in Biologie, Klinik und Therapie : Veröffentlichungen der Isotopenkommission der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften

Artikel: Die physikalischen Grundlagen der Isotopen

Autor: Scherrer, P. / Steffen, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-309184

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: 02.07.2025

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

D. K. 539.15

Die physikalischen Grundlagen der Isotopen

Von **P. Scherrer** und **R. Steffen**

Physikalisches Institut ETH Zürich

I. Aufbau der Atome und der Begriff der Isotopie

Während noch vor einigen Jahrzehnten die Atome als letzte unteilbare Bausteine der Materie galten, steht heute außer allem Zweifel, daß die Atome in mehr oder weniger komplizierter Art und Weise aus den sog. «Elementarteilchen» *Proton*, *Neutron* und *Elektron* aufgebaut sind. Die genialen Arbeiten von *Bohr* und *Rutherford* zeigen, daß die Atome in Form eines «Kernatoms» in Erscheinung treten. Die ganze Masse des Atoms ist im sog. Atomkern konzentriert, der positiv geladen ist. Um den Atomkern kreisen negativ geladene Elektronen, ähnlich wie die Planeten um die Sonne als Zentralkörper. Da das Atom als Ganzes neutral erscheint, bewegen sich soviele Elektronen in ganz bestimmter, schalenähnlicher Anordnung um den Atomkern, als der Kern positive Ladungen trägt. Die Struktur dieser Elektronenhülle ist nun allein bestimmend für die chemischen Eigenschaften des Atoms, d. h. die Hülle ist dafür maßgebend als welches chemische Element die Atome in Erscheinung treten. Die Zahl Z der Elektronen in einem Atom (Kernladungszahl) genügt also, um ein Atom einem bestimmten Element zuzuschreiben. Es gilt sogar der einfache Zusammenhang, daß die Kernladungszahl Z gleich der Nummer des betreffenden Elementes im periodischen System ist (z. B. $Z = 1$ Wasserstoffatom; $Z = 26$, Eisenatom, usw.).

Der *Atomkern* seinerseits ist nun ebenfalls kein einheitliches Gebilde, sondern ist aus den Elementarpartikeln, Protonen und Neutronen, aufgebaut. Das Proton ist ein einfach positiv geladenes Teilchen, dessen Masse etwa 2000mal größer ist als die Masse des Elektrons, während das Neutron keine Ladung trägt und praktisch die gleiche Masse wie das Proton besitzt. Das Neutron kommt in der Natur nicht frei vor, während das Proton den Kern des gewöhnlichen Wasserstoffatoms bildet. Die Anzahl der Protonen in einem Atomkern eines bestimmten Elementes ist demnach durch die Kernladungszahl Z festgelegt, während die Anzahl der Neutronen variieren kann. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, daß

die Atome eines bestimmten Elementes verschieden schwer sein können, entsprechend der verschiedenen Anzahl der Neutronen im Kern. Chemisch können solche Atomsorten nicht unterschieden werden, da ja ihre Elektronhüllen identisch sind. Atome, die sich nur durch die Neutronenzahl in den Atomkernen unterscheiden, werden als isotope Atome oder kurz als *J* bezeichnet. Die Tatsache, daß viele chemische Atomgewichte nicht gleich einem ganzzahligen Vielfachen des Wasserstoffatoms (= Proton) sind, erklärt sich einfach dadurch, daß in der Natur von einem chemischen Element verschiedene *J* in einem praktisch konstanten Mischungsverhältnis vorkommen. So erklärt sich z. B. das Atomgewicht 35,457 des Chlors dadurch, daß zu 75,4% das Cl-*J* Cl_{17}^{35}[1]) und zu 24,6% das *J* Cl_{17}^{37} immer in bestimmtem Verhältnis auftritt. In gleicher Weise haben auch andere Elemente verschiedene *J*, z. B. Wasserstoff mit dem Atomgewicht 1 und der schwere Wasserstoff mit dem Atomgewicht 2, welcher doppelt so schwer ist und Deuterium genannt wird.

Natürlicher Wasserstoff enthält 99,98% H_1^1 und 0,02% H_1^2. Weitere Beispiele sind: Stickstoff mit 2 *J*: N^{14} (99,62%) und N^{15} (0,38%) und Kohlenstoff mit 2 *J*: C_6^{12} (98,9%) und C_6^{13} (1,1%).

Die Separation verschiedener *J* desselben Elementes ist sehr schwierig durchzuführen, da *J* sich chemisch praktisch nicht unterscheiden, also auch nicht trennen lassen. Einzig die Reaktionsgeschwindigkeit bei bestimmten chemischen Reaktionen kann für verschiedene *J* desselben Elementes wegen des kleinen Massenunterschiedes wenig differieren. Im übrigen unterscheiden sich die *J* nur durch ihre physikalischen Eigenschaften, die im allgemeinen durch die verschiedenen *J*-Massen bedingt sind: so weisen die Spektren kleine Unterschiede auf, die darin ihre Ursachen haben, daß sich die isotopen Atomkerne wegen der verschiedenen Masse etwas anders im Atom bewegen. Wichtig für die praktische Trennung von *J* sind die Unterschiede der Diffusionsgeschwindigkeit und die verschiedenen spezifischen Ladungen (spezifische Ladung = Ladung des Atomions dividiert durch Masse des Atoms). Die letzte Eigenschaft wird im sog. Massenspektrographen zum Nachweis und zur Bestimmung der relativen Häufigkeit der *J* benutzt. Wir werden auf die Massenspektroskopie in anderem Zusammenhang noch zurückkommen.

Alle diese *J*-Unterschiede sind sehr feiner Natur und können nur relativ schwierig gemessen werden. Es besitzen aber fast alle Elemente *J*, die radioaktiv sind, und die sich daher relativ einfach als solche durch ihre Strahlung nachweisen lassen. Vor allem diese radioaktiven *J* sind es, die

---

[1]) In der Physik der *J* ist es üblich, neben das chemische Symbol eines Elementes als obern Index die Anzahl der Kernbausteine (= Proton + Neutron) und als untern Index die Kernladungszahl (= Protonenzahl) zu schreiben.

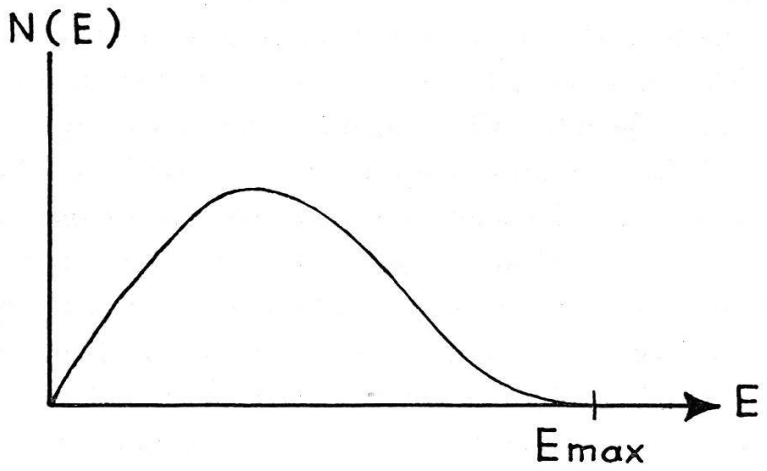
in der medizinischen, chemischen, physiologischen und biologischen Forschung eine entscheidende Rolle spielen.

Die chemische Identität der *J* eines Elementes und die physikalische Unterscheidbarkeit lassen sie als ideale Indikator-Substanzen erscheinen, um bestimmte chemische Reaktionen in lebenden Organismen oder auch im Reagenzglas zu studieren. Nach Eigenschaften, Herstellungsart, Verwendung und Art des Nachweises lassen sich die *J* grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen:

1. instabile (radioaktive) *J*;
2. stabile *J*.

II. Radioaktive Isotope (Eigenschaften, Herstellung und Verwendung)

Gewisse Atomkerne sind nichts Unveränderliches. Die natürliche Radioaktivität zeigt uns, daß sich Atome spontan abbauen können. Dieser Vorgang geht außer bei den Atomkernen mit sehr großem *Z* ($Z > 82$) und daher besonders instabilen Elementen (Uran, Thorium, Polonium, Radium usw.) auch noch bei Kalium, Rubidium, Samarium und Cassiopeium vor sich.



Dieser Abbau oder Zerfall folgt ganz bestimmten Gesetzmäßigkeiten: Die Anzahl der zerfallenden Atome nimmt exponentiell mit der Zeit ab, so daß nach einer sog. HWZ nur noch die Hälfte der ursprünglich existierenden radioaktiven Atome vorhanden ist, nach 2 HWZ nur noch ¼, usw. Die heute experimentell erfaßbaren HWZ variieren von Millionstelsekunden bis zu mehreren Milliarden Jahren.

Es ist üblich, die «Aktivität» einer radioaktiven Substanz in «Curie» zu messen. 1 Curie entspricht der Anzahl der pro Sekunde zerfallenden Atome eines Quantums Radium-Emanation im radioaktiven Gleichgewicht mit 1 g Radium. 1 Curie ist äquivalent $3{,}7 \cdot 10^{10}$ pro Sekunde zerfallenden Atomen.

Der Zerfall der Atomkerne kann auf sehr verschiedene Weise erfolgen: Entweder durch Aussendung eines α-Teilchens (= Helium-Kern, aus 2 Protonen und 2 Neutronen aufgebaut) oder durch Emission eines positiv oder negativ geladenen Elektrons (β-Teilchen). Interessant ist es, daß die β-Teilchen im Kern noch gar nicht vorhanden sind, sondern ein negatives Elektron (Negatron) sich erst bei der Verwandlung eines Neutrons in ein Proton und ein positives Elektron (Positron) sich bei der Verwandlung eines Protons in ein Neutron bildet. Da diese Umwandlung immer bei cst. Energieumsatz stattfindet, sollte man annehmen, daß die β-Teilchen alle mit derselben Geschwindigkeit herausfliegen. Die meisten β-Teilchen zeigen aber eine kleinere Geschwindigkeit: Es existiert ein kontinuierliches Geschwindigkeitsspektrum der β-Teilchen. Um den Verlust an Energie zu erklären, hat man angenommen, daß gleichzeitig mit dem β-Teilchen noch ein unbekanntes ungeladenes sehr leichtes Teilchen, ein sog. «Neutrino» ausgesandt wird, das den fehlenden Energiebetrag fortführt. Dieses Neutrino konnte experimentell erst in allerneuster Zeit auf indirektem Wege beobachtet werden.

An Stelle der Emission eines positiv geladenen Elektrons, Positron genannt, kann auch vom Atomkern ein negatives Elektron der Hülle eingefangen werden. Da meistens die dem Kern nächsten Elektronen, die sog. K-Elektronen, eingefangen werden, nennt man diesen Zerfallsprozeß K-Einfang. Bei der Auffüllung des durch K-Einfang entstandenen Loches in der Elektronenhülle wird die charakteristische Röntgenstrahlung des entstandenen Elementes (nicht des zerfallenden!) emittiert, wodurch der ganze Prozeß überhaupt erst beobachtet wird.

Die bei diesen Zerfallsprozessen entstehenden Atome sind im allgemeinen nicht im sog. Grundzustand, sondern besitzen noch eine gewisse Anregungsenergie. Dieser Energiebetrag wird aber in Form von γ-Strahlung (= elektromagnetische Strahlung sehr großer Energie, einige Millionen Elektronen-Volt!) sofort emittiert, und der Kern geht in den Grundzustand über. Es sind aber auch Fälle von angeregten radioaktiven Kernen bekannt, bei denen dieser γ-Übergang eine sehr lange HWZ besitzt, die Tage, ja sogar Monate betragen kann. Der radioaktive Kern ist in diesem Falle aus genau gleich viel Protonen und Neutronen aufgebaut wie der Kern im Grundzustand, also wie der stabile Kern. Man bezeichnet solche Kerne nach einer ähnlichen Erscheinung in der Chemie als isomere Kerne.

Experimentell kann man die α-, β- und γ-Strahlen wegen ihrer verschiedenen Durchdringungsfähigkeit der Materie gegenüber gut unterscheiden. So werden die α-Strahlen schon durch ein Papier mittlerer Stärke vollständig absorbiert, während die β-Strahlen je nach Energie

selbst Aluminiumblech einiger Millimeter Dicke zu durchdringen vermögen. Auch bei den γ-Strahlen hängt die Absorption mehr von der Energie ab. Eine γ-Strahlung mittlerer Energie, z. B. 1 Million Elektronen-Volt, wird in Aluminium nicht nennenswert absorbiert; es müssen fast 9 mm Blei durchdrungen werden, damit die Hälfte der ursprünglichen Intensität gemessen wird.

Bei quantitativen Indikatormessungen mit radioaktiven Isotopen ist die Kenntnis der Absorption der vom betreffenden Isotop ausgesandten Strahlung besonders wesentlich; man wird im allgemeinen radioaktive Isotope mit sehr durchdringender Strahlung vorziehen, falls solche Isotope des betreffenden Elements zur Verfügung stehen. Ist dies nicht möglich, so muß die Absorption der Strahlung auf dem Weg vom mutmaßlichen Ort der radioaktiven Indikatorsubstanz bis zum Nachweisgerät abgeschätzt werden. Im Fall der γ-Strahlung kann die Absorption einigermaßen berechnet werden, während die Absorption der β-Strahlung sehr kompliziert ist, und nur ungefähre Resultate erwartet werden können.

Der Nachweis der radioaktiven Strahlung kann auf sehr verschiedene Weise erfolgen. Das bequemste und daher auch am häufigsten verwendete Nachweisinstrument, besonders für β- und γ-Strahlung, ist das Geiger-Müllersche Zählrohr: in der Achse eines dünnen zylindrischen Metallgehäuses, dessen Wandstärke so bemessen ist, daß die β-Strahlung noch hindurchtreten kann, ist ein dünner Zähldraht isoliert aufgespannt. Zwischen Gehäuse und Zähldraht wird eine Spannung von 1000–2000 Volt angelegt. Der ganze Raum ist mit einer Mischung von Argon und Alkoholdampf gefüllt. Tritt z. B. ein Elektron in den Raum zwischen Gehäuse und Zähldraht, so tritt eine plötzliche Entladung ein, die mittels spezieller Verstärkerapparaturen registriert wird. So kann jedes einzelne Elektron gezählt werden. Die γ-Strahlung wird dadurch nachweisbar, daß durch sie Elektronen in der ZR-Wand ausgelöst werden, die dann vom ZR registriert werden.

In sehr vielen Fällen wird auch die Eigenschaft radioaktiver Strahlungen, die photographische Platte zu schwärzen, verwendet. Besonders praktisch ist diese Art des Nachweises bei Indikatorversuchen mit kleineren Tieren oder Pflanzen: Das betreffende Objekt oder vielleicht ein Schnitt desselben wird einfach auf die photographische Platte gelegt, und nach einer gewissen Zeit wird die Photoplatte dort geschwärzt sein, wo sich die Stellen größter Konzentration der Indikatorsubstanz im Untersuchungsobjekt befanden. Diese Art des Nachweises radioaktiver Indikatoren bezeichnet man als Radioautographie.

Die phantastisch anmutende Entwicklung der Kernphysik im letzten

Jahrzehnt setzt uns heute in den Stand, radioaktive Isotope jedes beliebigen Elementes künstlich herzustellen. Bei der Bestrahlung von stabilen Isotopen mit Neutronen können diese Neutronen «eingefangen» werden, und es bilden sich Kerne, die ein Neutron zu viel besitzen. Die bei der Neutronenanlagerung frei werdende Energie wird in Form von γ-Strahlung abgegeben. Solche Kerne sind nun im allgemeinen nicht stabil, sondern zerfallen, meistens durch Aussendung von Elektronen in das Element mit nächsthöherer Kernladungszahl. Auf diese Weise wird z. B. das viel verwendete radioaktive Phosphor -IsotopP_{15}^{32} nach folgender Reaktionsgleichung hergestellt:

$$P_{15}^{31} + N_0^1 \longrightarrow P_{15}^{32} + \gamma$$

gewöhnlicher Phosphor + Neutron → radioaktiver Phosphor + γ-Strahlung

P_{15}^{32} zerfällt mit einer HWZ von 14,3 Tagen unter Aussendung von Elektronenstrahlen.

Da heute in den Uranöfen, die öfters auch als «Pile» bezeichnet werden, in Amerika und England und neuerdings auch in Frankreich außerordentlich starke Neutronenquellen zur Verfügung stehen, können auf diese Art radioaktive Indikatorsubstanzen fast beliebiger Stärke hergestellt werden. Die heute der Wissenschaft von den Amerikanern zur Verfügung gestellten radioaktiven Isotope sind aus verschiedenen Publikationen ersichtlich (z. B. Nucleonics I, 64 (1947).

Eine weitere Möglichkeit, radioaktive Isotope herzustellen, ist die Bombardierung stabiler Elemente mit sehr schnellen geladenen Teilchen, wie sie im Cyclotron erzeugt werden. So werden z. B. im Cyclotron des Physikalischen Institutes der ETH Protonen (also Wasserstoffkerne) auf eine Geschwindigkeit von 35000 km/s beschleunigt und erzeugen beim Aufprall auf stabile Atomkerne Kernumwandlungen. Meistens findet der folgende Prozeß statt: Ein Proton dringt in einen Kern ein und schlägt ein Neutron heraus. Dabei wird die Kernladung um eine Einheit erhöht. Es entsteht also ein im allgemeinen radioaktives Isotop des nächsthöheren Elementes im periodischen System. Da eine Elementumwandlung stattfindet, kann das radioaktive Isotop chemisch vom bombardierten Element getrennt werden. Die bei diesem Prozeß entstehenden radioaktiven Isotopen sind im allgemeinen Positronenstrahler oder zerfallen durch K-Einfang. So entsteht bei der Reaktion

$$Cu_{29}^{63} + H_1^1 \longrightarrow Zn_{30}^{63} + N_0^1$$

stabiles Cu-Atom + schnelles Proton → radioaktives Zn-Atom + Neutron

radioaktives Zink, das in 38,3 Minuten zur Hälfte wieder in Cu^{63} zerfällt.

Mit dem Zürcher Cyclotron können radioaktive Zn^{63}-Präparate bis zu 0,5 Curie hergestellt werden.

Bei der Verwendung der radioaktiven Isotope als Indikatoren in der Biologie dürfen keine starken Präparate verwendet werden, um gewebeschädigende oder -beeinflussende Wirkungen zu verhindern. Wegen der großen Empfindlichkeit besonders des ZR genügen aber schon äußerst kleine Mengen radioaktiver Substanz zum Nachweis des Indikators. Die Sicherheits-Toleranzdosis beträgt für den Menschen 0,1 Röntgen pro Tag. Man wird also bei radioaktiven Indikatoren-Untersuchungen in der Biologie unterhalb dieses Wertes arbeiten.

Im Gegensatz dazu werden die radioaktiven Isotope bei therapeutischer Verwendung an Stelle von Röntgenstrahlen oder Radium in viel größeren Stärken verwendet. So werden in der Zürcher Kantonalen Frauenklinik schon seit längerer Zeit radioaktive Zn^{63}-Präparate zu radiotherapeutischen Zwecken verwendet, die im Cyclotron des Physikalischen Institutes der ETH aus gewöhnlichem Kupfer hergestellt werden (siehe obige Kern-Reaktionsgleichung!). Der Vorteil der künstlichen radioaktiven Isotope für therapeutische Zwecke liegt darin, daß das radioaktive Isotop, z. B. bei der Behandlung von Magenkrebs, mit der Nahrung eingenommen werden kann und bei richtiger Dosierung keine Schädigungen des Gewebes befürchtet werden müssen, da je nach HWZ die Strahlung schon nach Minuten oder Stunden abgeklungen ist, während bei der Verwendung von Radiumampullen wegen der großen HWZ (1580 Jahre) bei zu langer Bestrahlung Schädigungen eintreten können, oder auch die Gefahr des Verlustes des kostbaren Radiums besteht.

III. Stabile Isotope (Eigenschaften, Herstellung, Nachweis)

Wie genaue massenspektrographische Untersuchungen gezeigt haben, ist das Mischungsverhältnis der stabilen Isotope eines Elementes praktisch konstant, sofern nicht Mineralien verschiedenen Alters, die natürliche radioaktive Substanzen enthalten, in Betracht gezogen werden. Durch Änderung dieses Mischungsverhältnisses, z. B. durch künstliche Anreicherung eines speziellen Isotops des betr. Elementes, kann eine gewisse Menge desselben besonders gekennzeichnet werden und als Indikatorsubstanz dienen. Durch massenspektrographische Bestimmung des relativen Isotopen-Mischungsverhältnisses des Elementes an verschiedenen Stellen des Untersuchungsobjektes kann dann die Verteilung der Indikatorsubstanz im Objekt bestimmt werden. Die Verwendung der stabilen Isotope als Indikatoren ist genau analog der Verwendung der radioaktiven Isotope. An Stelle von Kernreaktionen dienen zur Herstellung stabiler Isotope Anreicherungs- oder Separationsverfahren, und an Stelle

des Nachweises durch das ZR oder die photographische Platte tritt der Massenspektrograph. Die Verwendung stabiler Isotope als Indikatoren ist dann gegeben, wenn keine geeigneten radioaktiven Isotope zur Verfügung stehen, oder wenn die radioaktiven Strahlen unliebsame Begleiterscheinungen hervorrufen. So ist man z. B. bei Indikatoruntersuchungen mit Stickstoff und Sauerstoff ganz auf die stabilen Isotope angewiesen, da diese Elemente nur radioaktive Isotope mit sehr kurzer HWZ besitzen. Die Elemente, bei denen meist zur Indikatormessung die stabilen Isotope verwendet werden, sind aus der folgenden Tabelle ersichtlich:

Element	Isotop	Rel. Häufigkeit in %
H	H_1^1	99,98
	H_1^2 (Deuterium)	0,02
B	B^{10}	18,4
	B^{11}	81,6
C	C^{12}	98,9
	C^{13}	1,1
N	N^{14}	99,62
	N^{15}	0,38
O	O^{16}	99,76
	O^{17}	0,041
	O^{18}	0,20
S	S^{32}	95,1
	S^{33}	0,74
	S^{34}	4,2
Ca	Ca^{40}	96,96
	Ca^{42}	0,64
	Ca^{43}	0,15
	Ca^{44}	2,06
	Ca^{46}	0,0033
	Ca^{48}	0,19
Fe	Fe^{54}	6,04
	Fe^{56}	91,57
	Fe^{57}	2,11
	Fe^{58}	0,28

In dieser Tabelle ist die relative Häufigkeit der einzelnen Isotope in Prozenten angegeben; diese Größe wird oft als «Atomprozent» des Isotops bezeichnet.

Bei der Verwendung der Indikatoren werden die Atomprozente eines bestimmten Isotops durch Anreicherung gegenüber dem natürlichen Isotopengemisch vergrößert. Man bezeichnet die Differenz zwischen den

Atomprozenten eines angereicherten Isotopengemisches und den Atomprozenten des natürlichen Isotopengemisches als «Atomprozent-Überschuß». (Nach *Schoenheimer* und *Rittenberg*, J. Biol. Chem. *127*, 273 [1947].) Eine mit O^{18} angereicherte Sauerstoffverbindung enthält z. B. 1,0 Atomprozent O^{18}, während im natürlichen Sauerstoff 0,20 Atomprozent O^{18} vorhanden sind. Der Atomprozent-Überschuß der betreffenden Verbindung beträgt also 0,8 Atomprozent O^{18}.

Zur Bestimmung der Atomprozente der Isotopen dient der Massenspektrograph. Im Massenspektrographen wird die Tatsache ausgenützt, daß das Verhältnis von elektrischer Ladung und Masse, die sog. spezifische Ladung von Ionen[1]), verschiedener Isotope desselben Elementes verschieden ist. Wird ein Strahl solcher Ionen des zu untersuchenden Isotopengemisches durch elektrische und magnetische Ablenkungsfelder geschickt, so werden Ionen mit größerer spezifischer Ladung mehr abgelenkt, als solche mit kleiner spezifischer Ladung. Da aber alle Ionen die gleiche Ladung besitzen, werden Ionen kleiner Masse mehr abgelenkt als solche großer Masse. Es findet demnach eine Trennung der Ionen verschiedener Isotope statt. Durch eine photographische Platte wird der Ort des Auftreffens der den verschiedenen Isotopen entsprechenden Ionenstrahlen genau registriert und daraus kann, da die Ladung der Ionen bekannt ist, die Masse der Isotope genau berechnet werden. Im allgemeinen können die Atomprozente eines Isotops auf 0,2 bis 1% genau bestimmt werden, je nach dem Element und dem absoluten Wert. Die absolute Empfindlichkeit eines guten Massenspektrographen beträgt etwa 0,004 Atomprozent. Die massenspektrographische Bestimmung der Atomprozente erfordert sehr wenig Substanz; etwa 50 μg eines Elementes sind genügend. Die Massenspektroskopie ist heute noch in voller Entwicklung, so daß in den nächsten Jahren noch viel Verbesserungen zu erwarten sind.

Zur Trennung oder Anreicherung von Isotopen müssen Eigenschaften des betreffenden Stoffes ausgenützt werden, die stark von seinem Atomgewicht abhängig sind. Solche sind z. B. die Verdampfungs- und Diffusionsgeschwindigkeit der gasförmigen Substanz. So kann O^{18} angereichert werden durch Verdampfen von flüssigem Sauerstoff. Der durch Fraktionieren flüssiger Luft technisch gewonnene Sauerstoff enthält 0,002% mehr O^{18}-Atome als der Sauerstoff gewöhnlicher Luft. Wird ein Gas gezwungen, bei sehr niedrigem Druck durch eine Reihe von Tonzylindern zu diffundieren, so kann ebenfalls eine Änderung des Isotopenmischungsverhältnisses erreicht werden. Bei Neon und Wasserstoff kann

---

[1]) Ionen sind Atome, die eine Ladung tragen.

auf diese Weise eine vollkommene Isotopentrennung herbeigeführt werden.

Eine vollständige Trennung allerdings nur relativ kleiner Mengen läßt sich mit dem Massenspektrographen erreichen, der an Stelle der photographischen Platte eine Auffangvorrichtung für die zu trennende Substanz besitzt.

Die Isotopentrennung wurde erst während des zweiten Weltkrieges als Großverfahren entwickelt, um das zur Herstellung der Atombombe wichtige Uranisotop U^{235} herzustellen. Dabei wurde besonders das Clusiussche Trennrohr-Verfahren verwendet. Es beruht auf dem Prinzip der Thermodiffusion. Die thermodynamische Statistik lehrt, daß sich in einem Gase, welches Bereiche verschiedener Temperatur enthält, an den warmen Stellen ein ganz klein wenig mehr von den leichten Atomen befinden, als dem durchschnittlichen Mischungsverhältnis entspricht. Dieser Effekt kann in folgender Weise zur Isotopentrennung nutzbar gemacht werden: Man bringt das zu trennende Isotopengemisch in ein vertikal stehendes langes Rohr, in dessen Achse ein Heizdraht gespannt ist. Durch diese Heizung ist die Rohrmitte wärmer als die Wand. Es findet sich also in der Mitte ein ganz geringfügiger Überschuß des leichtern Isotops. Die Erwärmung der Mitte hat aber auch noch eine andere Wirkung. Da warmes Gas eine geringere Dichte hat als kaltes, findet in der Mitte dauernd eine Strömung nach oben statt, an der Rohrwand eine solche nach unten. So wird fortwährend das leichte Isotop etwas bevorzugt nach oben, das schwere nach unten geschafft. Läßt man den Apparat längere Zeit arbeiten, so findet man schließlich im obersten Teil des Rohres das leichte Isotop, im untersten Teil das schwere.

Auch mit Hilfe sehr schnell rotierender Zentrifugen kann in einzelnen Fällen das Mischungsverhältnis von Isotopen in gasförmigen Verbindungen des betreffenden Elementes etwas geändert werden.

Andere Trennverfahren beruhen auf rein chemischen Prinzipien, indem kleine Unterschiede in den Reaktionsgleichgewichten ausgenützt werden. Da sehr viele Operationen nötig sind, um eine Trennung zu erhalten, werden zur Anreicherung von Isotopen Verfahren verwendet, die nach dem Gegenstromprinzip arbeiten. Es muß die Phase, welche etwas mehr leichte Isotope enthält, dauernd in einer Richtung strömen, die andere Phase dauernd entgegengesetzt, genau wie beim Trennrohr. Längs des ganzen Gegenstromapparates müssen die beiden Phasen natürlich in so engem Kontakt miteinander stehen, daß das Gleichgewicht zwischen ihnen immer wieder sehr rasch hergestellt wird.

Gewisse Isotope, vor allem Deuterium und gewöhnlicher Wasserstoff, lassen sich gut durch Elektrolyse trennen. So ist H_2^1O etwas leichter

elektrolysierbar als D_2^2O. Bei andauernder Elektrolyse wird also das schwere Wasser im Rückstand angereichert. Wegen der Verwendung in den Uranöfen zur Verlangsamung der Neutronen ist das schwere Wasser auch technisch enorm wichtig geworden. Daher wird heute der Trennung des D_2O von H_2O besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Wegen der Kompliziertheit und Langwierigkeit der Isotopentrennverfahren sind die stabilen Isotope im allgemeinen schwerer herzustellen als die radioaktiven Isotope, und dementsprechend sind die Herstellungskosten eher etwas größer. Auch in der Schweiz wurden die stabilen Isotope schon von mehreren Forschern zu Indikatorzwecken benützt. Besonders auf dem Gebiet der chemischen Physiologie konnten damit Ergebnisse erzielt werden, die ohne Verwendung der Isotopentechnik undenkbar wären.

Die Verwendung radioaktiver und stabiler Isotope in der medizinischen Forschung steht erst in den Anfängen, und doch sind schon erstaunliche Ergebnisse erzielt worden. Mit dem Verfügbarsein neuer radioaktiver und stabiler Isotope wird die medizinische Forschung nun in ein ganz neues Stadium treten, und die Welt darf auf die Ergebnisse gespannt sein.

Zusammenfassung

Jedes Element besitzt eine Anzahl Isotope, d. h. Atomkerne mit verschiedenem Gewicht bei gleicher Ladung. Man unterscheidet zwischen stabilen und unstabilen Isotopen.

Die stabilen Isotope kommen in der Natur in bestimmten konstanten Mischverhältnissen vor. Ihr Nachweis und die Messung des Mischverhältnisses geschieht mit dem Massenspektrographen. Durch Anreicherungs- und Separationsverfahren können die Mischverhältnisse künstlich beeinflußt werden. Ein technisches Beispiel für die Isotopentrennung bietet die für die Atombombe wichtige Anreicherung von Uran–235.

Unstabile Isotope kommen in der Natur bloß in kleiner Zahl vor. Dagegen ist es der Kernphysik gelungen, Hunderte von unstabilen Isotopen künstlich zu erzeugen. Solche radioaktive Kerne zerfallen durch Emission von α-, β- und γ-Strahlen. Ihr Nachweis geschieht meist mit Geiger-Müller-Zählrohren. Radioaktive Isotope leisten heute in Biologie und Medizin große Dienste.

Summary

Nuclei with different atomic weights and the same charge are called isotopic nuclei. Each element has several isotopes which may be either stable or unstable.

Stable isotopes are found in nature and are always in constant abundance ratios. They can be identified with a mass spectrometer. The isotopic ratios can be artificially varied by separation or enrichment as has been done in the separation of U–235 for the atomic bomb.

Very few unstable nuclei exist in nature. Nuclear physics makes it possible to produce hundreds of radioactive isotopes artificially. These unstable nuclei decay by emission of α-, β- and γ-rays which can be detected by means of a Geiger-counter. Radioactive isotopes are very important today for biological and medical research.