

# Physikalische Grundlagen zur Isotopen-Chemie

Von Prof. C. Frhr. v. WEIZSÄCKER KWI. für Physik, Göttingen

Das periodische System ist eine Anordnung der Elemente, die jedes Element durch eine Zahl kennzeichnet: die Ordnungszahl. Es ist für die ältere Chemie hinreichend gewesen, durch diese eine Zahl das Element zu charakterisieren. Der Begriff der Isotopie ist eine Erweiterung des Begriffs des Elements, der noch eine zweite Zahl zur Kennzeichnung eines Elements hinzuzieht. Denn es hat sich gezeigt, daß Substanzen, die chemisch identisch sind, noch verschiedene Atomgewichte haben können. Wir charakterisieren eine chemische Substanz also durch zwei Zahlen: die Ordnungszahl  $Z$  und das Atomgewicht  $A$ . Es wird behauptet, daß durch diese beiden Zahlen jede Substanz vollständig gekennzeichnet werden könne.

Es ist nun zu fragen: auf welche Weise haben wir Kenntnis von diesem Sachverhalt gewonnen, und wie kann man ihn daher näher untersuchen? Wir wollen an den Anfang stellen die schon 1815 von *Prout* aufgestellte Hypothese, daß die Atomgewichte aller Elemente ganzzahlige Vielfache desjenigen des leichtesten Elementes, des Wasserstoffs, sein sollten. Bei einer ganzen Reihe von Elementen ist dieser Satz gut erfüllt, und es ist nicht verwunderlich, wenn *Prout* die auch damals schon bekannten Abweichungen zunächst auf Ungenauigkeiten in den Messungen schob. Von den Chemikern der nachfolgenden Zeit allerdings ist diese Hypothese nicht sehr beachtet worden; da sich immer mehr herausstellte, daß die Atomgewichte nicht genau ganzzahlig sind. In der neueren Zeit ist in der Chemie die *Proutsche* Hypothese in veränderter Form wieder aufgelebt: Statt der Masse des H-Atoms erfüllt den Satz besser  $1/16$  der Masse des O-Atoms. Aber auch hier fallen einige Elemente heraus. Am deutlichsten ist das Versagen der Regel beim Chlor, dessen Atomgewicht 35,4 ist. In dieser Form ist also die *Proutsche* Hypothese noch nicht richtig. Und doch steckt darin, wie wir heute wissen, ein Kern der Wahrheit. Die Lösung der Schwierigkeiten erfolgt dadurch, daß einem Element mehrere, verschieden schwere Isotope zugeordnet werden. Das gewöhnliche Cl setzt sich zusammen aus zwei Substanzen mit den Atomgewichten 35 und 37, die etwa im Verhältnis 3:1 gemischt sind und so das Atomgewicht des gewöhnlichen Cl ergeben, das gerade mitten zwischen 35 und 36 liegt. Die beiden Isotope Cl haben wir zu unterscheiden. Auf jedes dieser Isotope für sich ist der *Proutsche* Satz anzuwenden.

Es gibt noch weitere Erscheinungen, die den Schluß auf eine Isotopie nahelegen. Das ist in erster Linie die der Radioaktivität. Aus den Umwandlungen in den radioaktiven Reihen folgt, daß es Stoffe geben muß mit dem gleichen chemischen Verhalten und verschiedenen Atomgewichten. Die drei radioaktiven Reihen führen alle auf Blei. Dieses Blei muß nun notwendigerweise ein verschiedenes Atomgewicht haben, je nach der Reihe, aus der es entstanden ist. Denn bei jeder radioaktiven Umwandlung ändert sich das Atomgewicht entweder um 4 ( $\alpha$ -Strahlung) oder um 0 ( $\beta$ -Strahlung). Die Th-Reihe, die ausgeht vom  $\text{Th}^{232}$ , kann daher nur auf  $\text{Pb}^{208}$  führen, während die U-Ra-Reihe, die im  $\text{U}^{238}$  ihren Ursprung hat, bei  $\text{Pb}^{206}$  endigen muß. — Ein anderes Beispiel ist folgendes: Das häufigste Uran-Isotop  $\text{U}_{92}^{238}$  zerfällt unter Aussendung eines  $\alpha$ -Teilchens in das Element mit der Ladung  $Z = 90$  und der Masse  $A = 234$ , ein Th-Isotop, das mit  $\text{UX}_1$  bezeichnet wird. Durch Aussendung zweier Elektronen bekommt dieses Element wieder die Ladung des Urans  $Z = 92$ , dagegen beträgt die Masse nur 234. Die Betrachtung dieses Vorgangs hat zu dem Schluß genötigt, daß es ein U-Isotop  $\text{U}_{92}^{234}$  geben müsse. Wir haben verschiedene Gründe angeführt, die uns zwingen, die Existenz von Isotopen anzunehmen. Wir fragen uns nun: kann man die verschiedenen Isotope eines Elements voneinander trennen? Die Trennung gelingt durch den Massenspektrographen<sup>1)</sup>. Das ist ein Apparat, in dem Kanalstrahlen, also ionisierte Atome, elektrische und magnetische Felder durchfliegen. In einem

homogenen Magnetfeld ist die Bahn eines geladenen Teilchens ein Kreis; die Ablenkung ist umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit des Teilchens und steht senkrecht auf dieser Geschwindigkeit und der Feldrichtung; in homogenen elektrischen Feldern fällt ein geladenes Teilchen genau so wie eine Masse im Erdfeld. Die Bahn ist also hier eine Parabel, die Ablenkung ist proportional zu  $1/v^2$ . Bei inhomogenen elektrischen Feldern, wie dem in Bild 1 gezeigten Radialfeld, kann man für Kanalstrahlen bestimmter Ener-

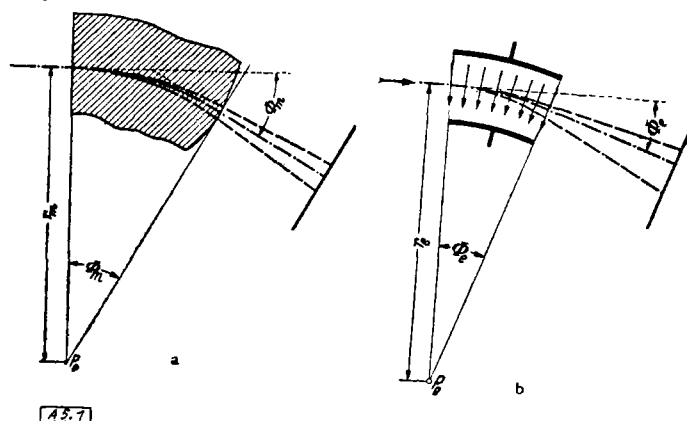


Bild 1  
Ablenkung von Kanalstrahlen im Magnetfeld (a) und elektrischen Radialfeld (b)

gie gleichfalls eine Kreisbahn erzielen. Die nächstliegende Versuchsanordnung ist die von *Thomson*. Ein Kanalstrahl wird am gleichen Ort der Wirkung eines elektrischen und eines dazu parallelen magnetischen Feldes unterworfen. In Feldrichtung erfolgt eine Ablenkung proportional zu  $1/v^2$ , senkrecht zur Feldrichtung eine solche mit  $1/v$ . Auf einer hinter der Anordnung angebrachten photographischen Platte zeichnet sich demnach für Ionen einer bestimmten Masse aber verschiedener Geschwindigkeit eine Parabel ab. Jeder Ionenmasse ist eine andere Kurve zuzuordnen (Bild 2). Die Intensität der Linien ist ein Maß für die Häufig-

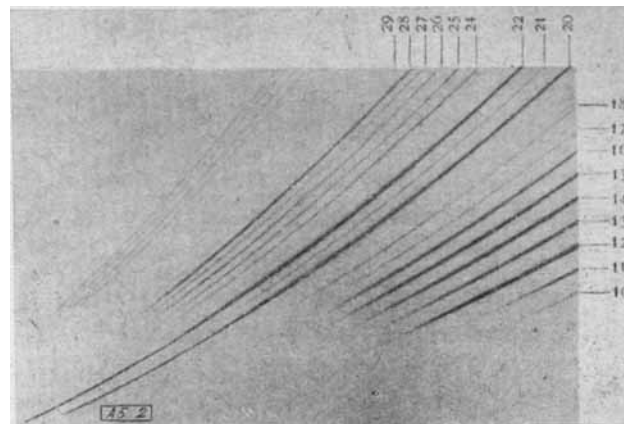


Bild 2  
Parabelspektrum nach J. J. Thomson (Aufnahme von W. Schütze). Füllgas der Entladungsröhre Neon, bei welchem  $\text{Ne}^{20}$ :  $\text{Ne}^{22}$  im Verhältnis 1:1 angereichert war. Die übrigen Parabeln stammen von Wasser und Kohlenwasserstoffen, welche von absichtlich zugesetztem Benzol herrühren und als Massenskale dienen sollen

keit der Isotope. — Gegenüber der *Thomsonschen* Anordnung hat der Massenspektrograph von *Aston* (Bild 3) den Vorteil, daß er

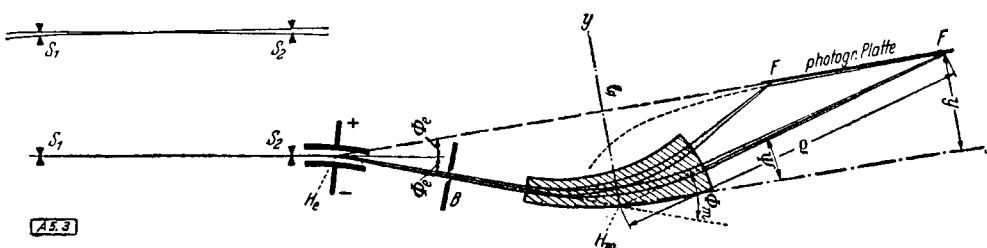


Bild 3  
Astons Anordnung, Geschwindigkeitsfokussierung

<sup>1)</sup> Vgl. *Mattauch*, diese Ztschr. 59, 37 [1947].

eine Geschwindigkeitsfokussierung liefert. Elektrisches und magnetisches Feld wirken in der angedeuteten Weise nacheinander auf die Ionen des Kanalstrahls. Die Felder sind senkrecht zueinander und zur Flugrichtung. Im elektrischen Feld wird ein langsam fliegendes Teilchen stärker abgelenkt als ein schnelles. Ionen gleicher Masse aber verschiedener Geschwindigkeit werden hier also getrennt. Im Magnetfeld werden die langsamen Ionen wieder stärker abgelenkt, so daß bei entsprechender Dimensionierung des Magnetfelds die Teilchen verschiedener Geschwindigkeiten in einem gewissen Punkt wieder vereinigt werden. Für verschiedene Massen ergeben sich verschiedene Brennpunkte. Die photographische Platte ist im Ort der Brennpunkte anzubringen. Wir haben gesehen, wie Isotope zu trennen sind. Man hat nun nach diesen Verfahren alle Elemente untersucht und fast für jedes mehrere Isotope gefunden. Es gibt häufige und seltene, stabile und instabile Isotope. Die in der Natur vorkommenden Elemente haben im allg. ein festes Mischungsverhältnis ihrer Isotope. Nur die durch radioaktiven Zerfall entstandenen Elemente machen eine Ausnahme. Ihre Zusammensetzung ist abhängig von ihrer Herkunft. In Bild 4 sind Massenspektren von gewöhnlichem Blei und von solchem, das aus Uran entstanden

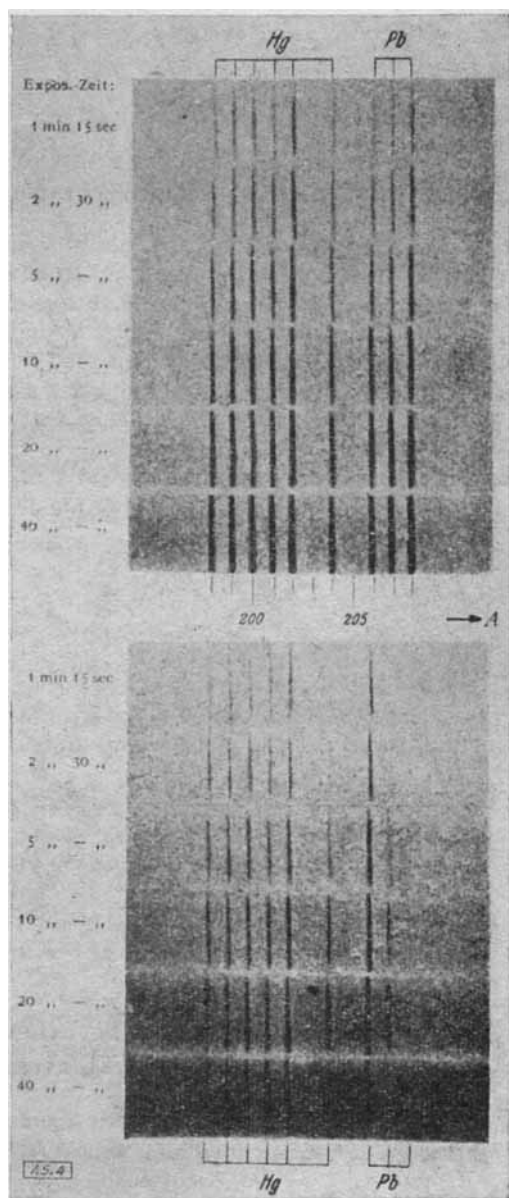


Bild 4

Massenspektren von gewöhnlichem und von Uranblei nach *Mattauch und Herzog*. Kathodenfüllung oben: 0,050 g gewöhnliches Bleichlorid, unten: 0,050 g Bleichlorid aus Katanga Curit (Präp. von *O. Hönigschmid*)

ist, dargestellt. Beim Uranblei sind die Linien für die Massenzahl 207 und 208 sehr schwach, dagegen tritt die bei 206 sehr stark hervor – in Übereinstimmung mit dem, was im Vorhergehenden über die Entstehung des Uranbleis gesagt wurde. – Die Massenspektroskopie gestattet uns, die *Prout'sche* Hypothese von der

Ganzzahligkeit der Massen der Isotope nachzuprüfen. Sie ist überhaupt die genaueste Bestimmung der Isotopengewichte. In Bild 5 sind Spektren von Molekeln dargestellt, die, wäre die *Prout'sche*

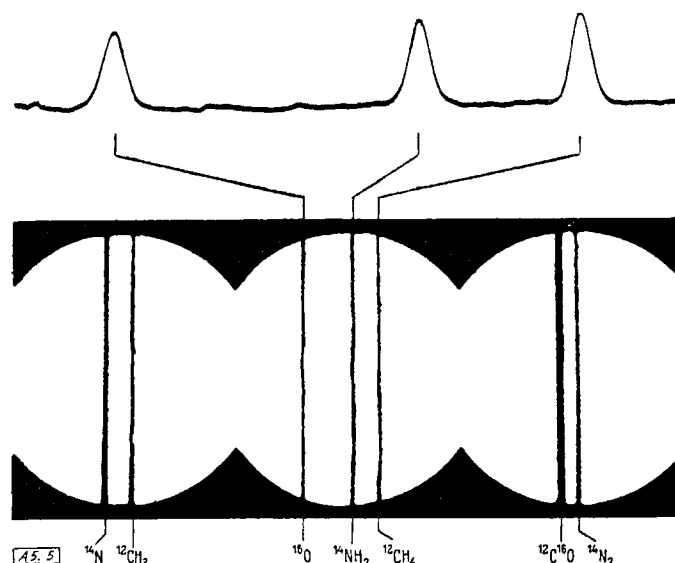


Bild 5

Messdubletts nach *J. Mattauch und A. Bönisch* (65). Die Massendifferenzen stehen zum Teil miteinander in Beziehung, die eine Überprüfung der Messwerte gestatten

Hypothese für die Isotope richtig, alle an der gleichen Stelle liegen müßten. Es zeigt sich aber, daß in jedem der durchgemessenen Fälle die Linie aufspaltet, u. zw. in der Richtung, daß ein schweres Element  $E^x$  leichter ist als das  $x$ -fache der Masse des Wasserstoffs, z. B. ist  $O^{16}$  leichter als das 16fache der Masse von H. In diesen Feinheiten versagt also die *Prout'sche* Hypothese. Wir haben die Aufgabe zu erklären, weshalb sie versagt. Wir treten damit ein in die Kernphysik.

Jedes Atom besteht aus Kern und Elektronen. Der Kern besteht aus Protonen und Neutronen. Wir haben oben ein Element charakterisiert durch die Ordnungszahl. Die Ordnungszahl  $Z$  ist identisch mit der positiven Ladung des Kerns, gemessen in der Einheit der elektrischen Elementarladung. Diese positive Ladung  $Z$  befähigt den Kern, ebenso viele Elektronen als Atomhülle zu binden. Da ein Proton einfach geladen ist, enthält ein Atomkern also  $Z$  Protonen. Der Rest der Masse des Kerns besteht aus Neutronen. Wir wissen, daß das Neutron fast genau so schwer ist wie das Proton. Bezeichnen wir die Zahl der Neutronen mit  $N$ , so ist also  $N + Z = A$ . Als Faustregel gilt vor allem für leichte Kerne  $A = 2Z$ . Wir deuten das so, daß zu jedem Proton im allg. ein Neutron vorhanden ist. Jenes Ergebnis der Massenspektroskopie, nach dem ein schwerer Kern stets leichter ist als die Summe seiner Bestandteile, erklären wir nun folgendermaßen. Es tritt bei der Bildung zusammengesetzter Kerne aus einfachen ein Massenverlust auf. Nach der Relativitätstheorie ist jede Masse mit einer Energie verknüpft durch die Gleichung  $E = mc^2$ . Diese Energie ist in unserm Fall die Bindungsenergie der Kernbausteine aneinander, d. h. die Energie, die frei wird, wenn man die Bausteine des zusammengesetzten Kerns verbindet, oder umgekehrt, die man aufwenden müßte, um den Kern in seine Bestandteile zu zerlegen. Sie entspricht der Wärmetönung bei chemischen Reaktionen. Die Massenspektroskopie liefert uns also sogar quantitativ die Bindungsenergie. Dies ist nicht nur theoretisch gefolgert, sondern experimentell durch direkte Messung der Umwandlungsenergien bei Kernreaktionen bestätigt.

Abgesehen von den leichtesten Elementen werden die einzelnen Bausteine jeweils mit ungefähr gleicher Energie in die Kerne eingebaut. Den Verlauf dieser Bindungsenergie je Kernbaustein, den man als Packungsanteil bezeichnet, gibt Bild 6 wieder. Bei den leichten Kernen ist der Packungsanteil gering. Bei  $A \sim 40$  erreicht er einen Wert, den er für die schwereren Kerne nahezu beibehält.

Als Erfahrungsgesetz hatten wir erkannt, daß  $A \sim 2Z$  ist, d. h. daß die Anzahl von Protonen und Neutronen im Kern ungefähr gleich ist. Dieses Gesetz stimmt recht gut bei leichten Kernen,

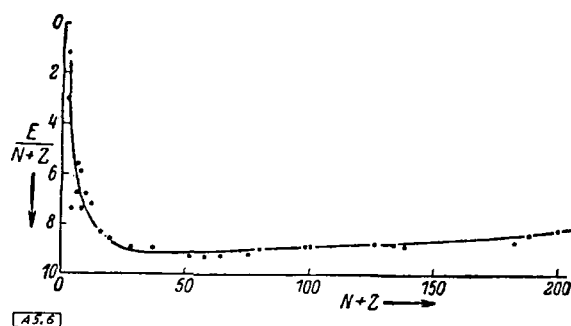


Bild 6  
Bindungsenergien der Kerne je Teilchen als Funktion von  $N + Z$

bei schweren überwiegen die Neutronen. Eine Darstellung dieses Sachverhalts gibt Bild 7, in der die Lage der stabilen Isotope

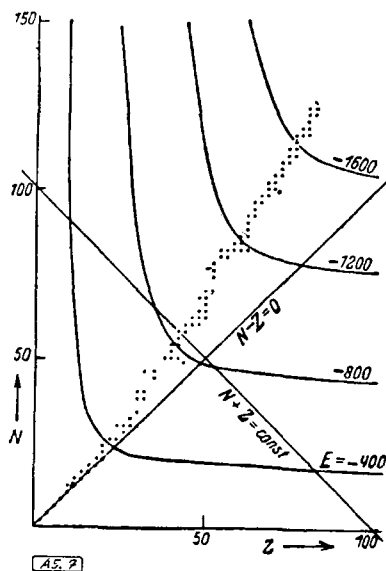


Bild 7  
Lage der stabilen Kerne und Kurven konstanter Bindungsenergie

durch Angabe von  $N$  und  $Z$  dargestellt ist. Das Überwiegen der Neutronen bei schweren Kernen beruht auf der gegenseitigen elektrostatischen Abstoßung der Protonen. Die in die Abbildung eingetragenen Hyperbeln bezeichnen Kurven konstanter Bindungsenergie. In Bild 8 ist der Verlauf der Energiekurve für die

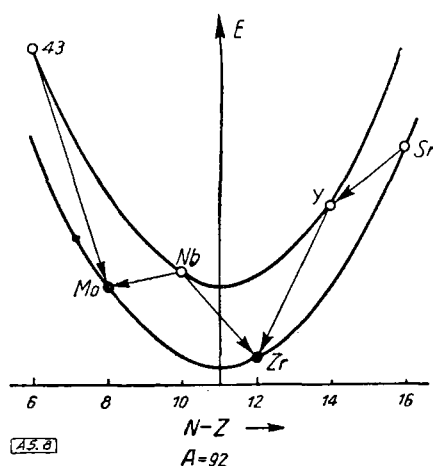


Bild 8  
Bindungsenergien der geraden Kerne. (Aus: Heisenberg "Die Physik der Atomkerne")

Massenzahl 91 dargestellt. Das stabile Isotop hat hier das Element Zr. Die übrigen Kerne der Kurve sind instabil und suchen durch  $\beta$ -Zerfall, d. h. spontane Umwandlung eines Protons in ein Neutron unter Emission eines Positrons, bzw. Umwandlung eines Neutrons in ein Proton unter Emission eines Elektrons in  $Zr^{91}$  überzugehen, wie es die Pfeile andeuten. Bei Kernen gerader Massenzahl (z. B.  $A = 92$ , Bild 9) ist der Verlauf der Kurve für

die Bindungsenergie nicht so einfach. Hier macht sich eine der Feinheiten in der Energiebestimmung bemerkbar, die in unserer

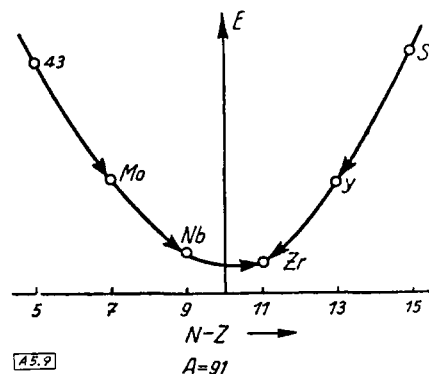


Bild 9  
Bindungsenergie ungerader Kerne. (Aus: Heisenberg "Die Physik der Atomkerne")

ganz rohen Betrachtung nicht enthalten ist. Die Erfahrung zeigt, daß Kerne, für die sowohl  $Z$  wie  $N$  gerade Zahlen sind, stabiler sind als solche, die ungerades  $Z$  und  $N$  haben. (Bei Kernen mit ungerader Massenzahl ist immer entweder  $Z$  oder  $N$  ungerade.) Wir müssen hier deshalb für die beiden Arten von Kernen zwei verschiedene Kurven zeichnen. Da die Umwandlung eines Kernes in einen anderen nur durch Aussendung eines Elektrons oder Protons erfolgen kann, sind nur die Übergänge, die in Abb. 9 durch Pfeile angedeutet sind, in energetisch günstigere Kerne möglich. Auf der unteren Kurve liegen also zwei stabile Kerne:  $Mo^{92}$  und  $Zr^{92}$ . Der Übergang von  $Mo^{92}$  in  $Zr^{92}$  könnte nur durch gleichzeitige Aussendung von 2 Positronen geschehen; das ist ein so unwahrscheinlicher Prozeß, daß auch  $Mo^{92}$  praktisch stabil ist.

Zum Schluß wollen wir noch zwei weitere Methoden zum Nachweis von Isotopen besprechen. Beides sind optische Methoden. Die Hyperfeinstruktur der Spektren verrät uns einiges über die Massenzahl des Atomkerns. Das Atomspektrum ist im wesentlichen bestimmt durch die Anzahl der Elektronen, die den Kern umkreisen, also durch die Ladung des Kerns. Die übrigen Eigenschaften des Kerns prägen sich nur in der sog. Hyperfeinstruktur des Spektrums aus. Da gibt es Einflüsse verschiedener Art. Die beiden Isotope des Wasserstoffs  $H_1^1$  und  $D_1^2$  unterscheiden sich in ihrer Masse um den Faktor 2; daher ist die durch den Umlauf des Elektrons bewirkte schwache Bewegung des Kerns um den gemeinsamen Schwerpunkt von Kern und Elektronen in beiden Fällen verschieden. Das bedingt einen Unterschied in der Lage der Spektrallinien. Dieser Effekt verschwindet bei den Isotopen der schweren Kerne, da die Massenunterschiede zu gering werden. Hier gibt es einen Einfluß auf die Spektren infolge des Eigendralls der Kerne, der seinerseits abhängt von der Zahl der Kernbausteine. Abb. 10 zeigt eine Hyperfeinstrukturaufnahme des Bleis verschiedener Herkunft. Neben dem normalen Blei ist solches aus Uran-Erzlagern untersucht. Man erkennt deutlich die

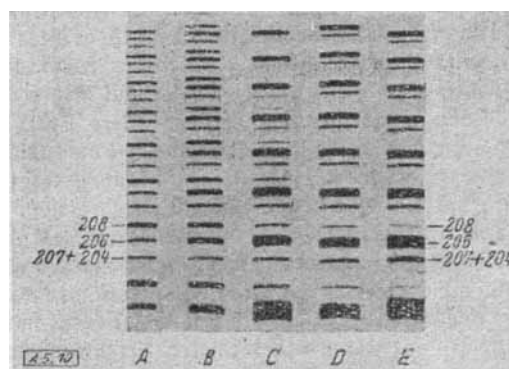


Bild 10

Hfs-Aufnahmen an verschiedenen uranhaltigen Bleiprobe (2 = 5372). Nach Rose und Stranathan. - A) Normales Blei - B) Colorado Caronit - C) Wilberforce Uranit - D) Pechblende vom großen Bärensee - E) Katanga Pechblende. (Aus: Kopfermann "Kernmomente")

Intensitätszunahme der Linie von  $\text{Pb}^{208}$  gegenüber der von  $\text{Pb}^{206}$ . Abb. 11 stellt zwei Aufnahmen von Na dar, bei denen das Mischungsverhältnis von  $\text{Na}^{23}$  zu  $\text{Na}^{20}$  einmal 1 : 9, beim anderen 1 : 3 beträgt.

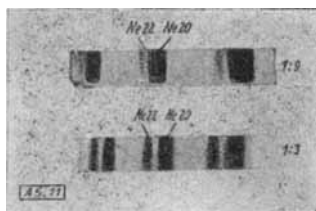


Bild 11

Isotopieverschiebung a) zwischen  $\text{Ne}^{23}$  und  $\text{Ne}^{20}$  (Gemisch 1 : 9 bzw. 1 : 3). (Aus: Kopfermann "Kernmomente")

Außer den Atomspektren kann man auch die Molekelspektren zur Untersuchung auf Isotope heranziehen. Hier ist die Intensität

der verschiedenen Linien einer Bande abhängig von den in der Molekel gebundenen Isotopen. Z. B. zeigt sich bei einer  $\text{N}_2$ -Molekel, die von zwei Atomen  $\text{N}^{14}$  gebildet wird, ein Intensitätswechsel in den aufeinander folgenden Linien einer Bande. Dieser Intensitätswechsel beruht auf einem quantenmechanischen Resonanzeffekt. Wenn nun in der Molekel zwei verschiedene Isotope, etwa  $\text{N}^{14}$  und  $\text{N}^{15}$  gebunden sind, so tritt die Resonanz und damit der Intensitätswechsel der Bande nicht ein. So ist uns auch in den Bandenspektren ein Hilfsmittel gegeben, das gestattet abzuschätzen, welche Isotope in einer Molekel vorliegen.

Rückblickend können wir feststellen, daß die durch die Entwicklung der Wissenschaft bedingte Verfeinerung der alten *Prout'schen* Hypothese uns zu einem vertieften Verständnis des periodischen Systems und des Aufbaus der Elemente geführt hat. Die ursprünglich aus theoretischen Erwägungen heraus gefolgerte Existenz der Isotope ist auf verschiedene Weise experimentell nachgewiesen worden, so daß sie heute zum festen Bestand unserer Kenntnis vom Aufbau der Materie gehört.

## Die Erzeugung künstlich radioaktiver Atomarten

Von Prof. Dr. W. BOTHE, Heidelberg, Kaiser-Wilhelm-Institut für medizinische Forschung, Institut für Physik

Das Ziel dieses Aufsatzes kann nicht eine erschöpfende Darstellung des umfangreichen Gegenstandes sein. Es soll nur ein Überblick gegeben werden über die Möglichkeiten, aber auch die Schwierigkeiten und Beschränkungen in der Herstellung derjenigen radioaktiven Atomarten, die auf anderen Forschungsgebieten als der eigentlichen Kernphysik, sowie in der Praxis Verwendung finden können. Nach den „Kernphysikalischen Tabellen“ von *Mattauch-Flügge* waren 1942 rd. 350 radioaktive Atomarten bekannt, und es werden ständig mehr. Davon wird aber i. allg. nur ein kleiner Teil in diesem Zusammenhang in Betracht kommen, aus verschiedenen Gründen, auf die noch einzugehen sein wird.

Zunächst sei die Technik der Herstellung radioaktiver Stoffe kurz behandelt. Künstliche Radioaktivität erzeugt man durch Kernprozesse, also durch Strahlungen. Dazu kann man die verschiedensten Strahlenarten benutzen:  $\alpha$ -Strahlen, Deuteronen, Protonen, Neutronen,  $\gamma$ -Strahlen, nur Elektronen bisher nicht; aber auch dies ist sicher nur eine Frage der Zeit. Man braucht also Strahlenquellen. Es gibt einfache aber kostspielige Strahlenquellen, komplizierte und billigere, und es gibt auch sehr komplizierte und dabei sehr kostspielige Strahlenquellen, wobei die letzteren, um dies gleich vorweg zu bemerken, keineswegs immer die zweckmäßigsten sind.

Sehr einfach zu handhaben sind die natürlichen Strahlenquellen, das Radium und das Mesothor und die in Frage kommenden Folgeprodukte. Z. B. ist eine innige Mischung von Radium-Salz oder Radiumemanation mit Beryllium-Pulver, gut verschlossen, eine sehr bequeme Neutronenquelle. Aber die damit erzielbaren Aktivitäten sind gering. Selbst mit 1 g Ra, das schon ein sehr kostspieliges Präparat darstellt, gewinnt man Aktivitäten, die nur in Sonderfällen ausreichen werden.

In der Hauptsache ist man also auf künstliche Strahlenquellen angewiesen, d. h. technische Einrichtungen, in denen geladene Teilchen durch elektrische Felder auf die gewünschte kinetische Energie beschleunigt werden. Diese Energie pflegt man in e-Volt zu rechnen, d. i. einfach die Potentialdifferenz, die das Teilchen, wenn es eine Elementarladung trägt, durchlaufen muß, um die betreffende Energie zu gewinnen. Die gewöhnlichen natürlichen  $\alpha$ -Teilchen haben bis zu 8 MeV (Millionen e-Volt). So hohe Spannungen zu erzeugen, ist nun allerdings eine Aufgabe, die mindestens an der Grenze des heute technisch Möglichen liegt. Glücklicherweise ist das auch gar nicht nötig, man kann sich meist mit wesentlich kleineren Beschleunigungsspannungen begnügen, indem man durch die Strahlenmenge ersetzt, was an Strahlenenergie fehlt. Will man nun z. B. Strahlen von 1 MeV herstellen, so wäre es das nächstliegende, einen Transformator für 1 MV zu benutzen. Aber auch das tut man nicht, es hat sich als viel zweckmäßiger erwiesen, von einer verhältnis-

mäßig niedrigen Transformatorspannung auszugehen (etwa 200000—300000 V) und durch gewisse Kuntschaltungen zu erreichen, daß sich diese Spannung mehrmals übereinander-türmt. Bild 1 zeigt das zuerst von *Greinacher* angegebene

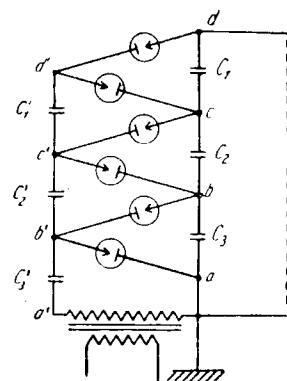


Bild 1  
Schema des Kaskadengenerators

Schaltbild eines solchen „Kaskadengenerators“, der in der Hauptsache aus einem verhältnismäßig kleinen Transformator, Kondensatoren und Ventilen besteht. Bild 2 zeigt als praktische Ausführungsform die beiden von *Siemens* gebauten 1,4-MV-

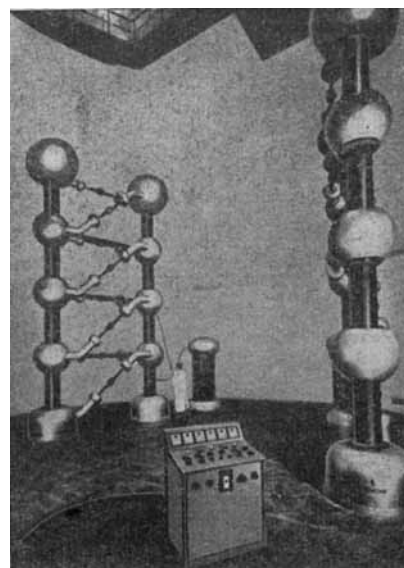


Bild 2  
Kaskadengeneratoren von Siemens