

ÜBERSICHT ÜBER DIE RADIOAKTIVITÄTSFORSCHUNG UND ÜBER DIE
THEORETISCHEN GRUNDLAGEN BIS ZUR ENTDECKUNG DER
KERNSPALTUNG

Zur Einführung in die Fachliteratur

von Vera Morgenweck

Materialien zum Vortrag im Seminar von Prof. Trömel, Institut für Anorganische
Chemie, Universität Frankfurt a. Main
im Frühjahr 1998

Inhalt

A. Zeitlicher Abriss bis zur Entdeckung der Kernspaltung	3
B. Radiochemie - Kernchemie	6
1. Radiochemie	6
1.1. Methoden	6
1.1.1. Fraktionierte Kristallisation	6
1.1.2. Mitfällung durch Trägersubstanzen	7
1.1.3. Indikatormethode	8
1.1.4. Emaniermethode	8
1.2. Anwendungen	8
2. Kernchemische Grundlagen	10
2.1. Nuklide	10
2.1.1. Stabilität	10
2.1.2. Natürliche Zerfallsreihen	11
2.1.3. Kernisomerie	15
2.2. Kerneigenschaften	15
2.2.1. Kernkraft	15
2.2.2. Massenzahl, Nuklidmasse, Massendefekt	18
2.2.3. Kernmodelle	18
2.3. Kernumwandlungen	19
2.3.1. Mononuklear	19
2.3.1.1. Energetik	19
2.3.1.2. α - Strahlen	19
2.3.1.3. β - Strahlen	23
2.3.1.4. γ - Strahlen	24
2.3.1.5. Spontanspaltung	24
2.3.1.6. Zerfallsgesetz - Aktivität	24
2.3.1.7. Impulsrate	26
2.3.1.8. Radioaktives Gleichgewicht	28
2.3.2. Binuklear	29
2.3.2.1. Chemische Reaktion und Kernreaktion - Ein Vergleich	29
2.3.2.2. Energetik	30
2.3.2.3. Bestimmungsverfahren und Energieeinheiten	30
2.3.2.4. Induzierte Kernspaltung	34
2.3.2.5. Übersicht über die Kernumwandlungen	37
C. Literatur	38

A. Zeitlicher Abriss bis zur Entdeckung der Kernspaltung

Der Atombegriff wandelte sich entscheidend, als die Radioaktivität entdeckt wurde. Mit Hilfe der radioaktiven Strahlen wurde die Erforschung der Atome erst möglich.

- 1896** *Bequerel* entdeckt die radioaktive Strahlung.
- 1899** *Rutherford* stellt fest, dass die Uranstrahlung aus zwei Komponenten (α - und β - Strahlung) mit unterschiedlichem Durchdringungsvermögen besteht.
- 1900** *Paul Villard* entdeckt die γ -Strahlung, eine kurzwellige, d.h. energiereiche, elektromagnetische Strahlung.
Auch α - **Strahlen** sind sehr energiereich und man erkannte ihre Eignung als **Geschosse** zur Untersuchung des Atombaus.
- 1911** *Rutherfords* Streuexperimente ("**Die Atome sind fast leer**"). *Soddy* entdeckt die **Isotopie**.
- 1913** *Bohr* verbindet die *Planckschen* Quantenhypothesen mit dem neuen Atommodell von *Rutherford*. Dies ist der Beginn der **Quantentheorie**. Sie beschreibt die Gesetzmäßigkeiten atomarer und subatomarer Teilchen, die nicht mit den Mitteln der klassischen Physik beschrieben werden können. Das Atom, keine 'Kugel', sondern ein komplexes Gebilde, folgt ganz anderen Regeln.
Moseley entdeckt die **Kernladung**.
- 1919** *Rutherford* gelingt die **erste künstliche Atomumwandlung**. Er fand nach dem Beschuss mit α -Teilchen jedes Mal Wasserstoffkerne. Der Atomkern des Wasserstoffs muss also Bestandteil aller anderen Atomkerne sein. Er nennt es "**Proton**".
Die aktuelle Atomvorstellung: Der Atomkern besteht aus Protonen und Elektronen, so dass die Kernelektronen einen Teil der Protonen neutralisieren. Durch eine unterschiedliche Zahl von Kernelektronen könnten so verschieden schwere Atomkerne mit gleicher Kernladung entstehen. Die Hypothese steht aber in Widerspruch zu den Gesetzen der Quantenmechanik.
- 1928** *Gamov* entwickelt die quantenmechanische Theorie des **α -Zerfalls**.
- 1930** *Bothe* und *Becker* finden bei Beschuss von Beryllium mit α -Strahlung eine stark durchdringende Strahlung, die zunächst für γ -Strahlung gehalten wird.
- 1932** *Chadwick* schließt aus der Rückstoßenergie dieser Strahlung, dass ihre Teilchen etwa die gleiche Masse wie die Protonen haben. Wegen ihrer starken Durchdringungsfähigkeit mussten sie elektrisch neutral sein. Das **Neutron** ist gefunden. Die Mängel der neuen Atomvorstellung sind damit behoben.
Atome, deren Kern durch die Angabe der Massenzahl definiert ist, werden jetzt als **Nuklide** bezeichnet.

Cockcroft und *Walton* bauen den ersten elektrostatischen Beschleuniger, mit dem Protonen auf so hohe Energien beschleunigt werden können, dass sie mit Lithiumkernen reagieren.

Das **Positron** wird noch in diesem Jahr von *C.D. Anderson* nachgewiesen.

(Anm.: Das **Neutrino** wurde bereits 1930 von Pauli postuliert, wird aber erst in den fünfziger Jahren entdeckt werden. Diese Vorstellungen, die bis 1932 erarbeitet wurden, bilden die Grundlage für unser heutiges Verständnis über den Aufbau der Atome.)

1934 *Joliot* und *I. Curie* entdecken die **künstliche Radioaktivität**.

Fermi erkennt, dass Neutronen sich besonders gut als Geschosse auf Atomkerne eignen. Er bestrahlt alle Elemente, auch Uran, mit Neutronen, die er aus einer Radon-Beryllium-Quelle erhält. Die Bildung künstlicher Elemente wird diskutiert.

(Anm.: Die Annahme einer Spaltung wurde als "unphysikalisch" betrachtet. Niemals waren bei Kernreaktionen bisher größere Bruchstücke als α -Teilchen bemerkt worden. Man konnte mit den quantenmechanischen Gesetzen den α -Zerfall der natürlichen Zerfallsketten gut verstehen. Für größere Kernfragmente aber wächst das notwendige Potential, um das Atom verlassen zu können, so stark an, dass der Vorgang als unwahrscheinlich angesehen wurde.)

Die *Fermi*-Gruppe entdeckt, dass **verlangsamte Neutronen** die Reaktionsrate stark ansteigen lassen. Die Neutronen übertragen bei jedem Stoß einen beträchtlichen Teil ihrer Energie auf den Wasserstoffkern bis sie schließlich im thermischen Gleichgewicht mit ihrer Umgebung sind.

(Anm.: Dieser Vorgang wurde als '**Verstärkung**' bezeichnet und als Methode für die weitere Entwicklung äußerst wichtig.)

Meitner ist an diesen Ergebnissen hoch interessiert und überredet *Hahn*, mit ihr zusammen ebenfalls daran zu forschen. Um die einzelnen Nuklide identifizieren zu können, sind chemische Analysen notwendig. Im Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin-Dahlem beginnen die Arbeiten über die '**Transurane**', künstliche Elemente schwerer als Uran. Der Analytiker *Straßmann* wird hinzugezogen.

1937 betrachten *Hahn* und *Meitner* ihre Transuran-Arbeiten als vorläufig abgeschlossen. Es bleiben Fragen offen, für die es aber momentan keine Antwort gibt.

1938 Ein "3,5-Stundenkörper" aus dem Labor von *Joliot/Curie* veranlasst *Hahn/Meitner* zum Weitermachen, allerdings erfolglos.

Im Sommer sieht sich die Halbjüdin *Meitner* gezwungen, aus Nazi-Deutschland zu fliehen, da man ihr willkürlich verweigerte, einen Pass auszustellen.

Im Herbst untersuchte *Curie*, ob es sich bei dem '3,5h-Körper' nicht vielleicht um Actinium handele. Dabei mischt sie Lanthan und Actinium und führt fraktionierte Kristallisationen durch. *Hahn* und *Straßmann* wiederholen die Versuche. Auch sie können diese Aktivität nachweisen, halten sie aber für eine Mischung aus drei verschiedenen Radium-Isotopen.

Im Dezember erweist sich durch die exakte Arbeit *Hahns* und *Straßmanns* eines der 'Radium-Isotope' als **Barium**. Für beide ist klar, dass mit dem Urankern etwas Gravierendes passiert ist, was man bis dahin nicht für möglich

gehalten hat. Sie nennen es "Zerplatzen". Die Vermutung einer **Kernspaltung** lässt sich nicht umgehen. *Meitner* und *O.R. Frisch* interpretieren den Vorgang mit dem Tröpfchenmodell von *Bohr*.

(Anm.: Das Tröpfchenmodell des Atomkerns wurde von Bohr bereits Mitte der dreißiger Jahre ausgearbeitet, aber bis dahin nicht auf Kernreaktionen angewendet.)

1939 Hahn und Straßmann identifizieren die **Spaltprodukte** ^{139}Ba und ^{140}Ba . Sie weisen nach, dass Thorium beim Beschuss mit schnellen Neutronen ebenfalls spaltet. Sie können als weitere Bruchstücke Strontium und Yttrium und das Entstehen von Edelgasen nachweisen. Damit war jeder Zweifel ausgeschlossen.

Philip *Abelson* will vermutete Transurane durch ihre möglicherweise charakteristische Röntgenstrahlung nachweisen. Die Röntgenstrahlung erweist jedoch ein Iod-Isotop.

Unabhängig davon, wie die Spaltung vom Uran im Einzelnen verläuft, haben die Spaltprodukte gegenüber den stabilen Isotopen einen beträchtlichen Neutronenüberschuss. Dieser Überschuss kann durch β -Zerfall abgebaut werden. Er wird aber auch durch Emission von Neutronen verringert. Der Gedanke einer **energieliefernden Kettenreaktion** liegt nahe.

Im September erweitert *Bohr* mit *Wheeler* das Liquid drop model (LDM).

PERIODENSYSTEM DER ELEMENTE

1934																He 2	
H 1											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10	
Li 3	Be 4											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
Na 11	Mg 12	3	4	5	6	7											Kr 36
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	/	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	/	Rn 86
/	Ra 88	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	?	?										

LANTHANIDEN	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	/	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
-------------	----------	----------	----------	----------	---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Abb. 1 Das Periodensystem der dreißiger Jahre

B. Radiochemie - Kernchemie

Was ist der Unterschied?

Kernchemie: Ein Teilgebiet der Kernphysik, welches sich mit den Kernreaktionen, mit den Methoden zur Erzielung von Kernreaktionen und den Eigenschaften der entstehenden Endprodukte befasst. Der Begriff ist durch die formale Ähnlichkeit der Kernreaktionen mit chemischen Reaktionen begründet.

Radiochemie: Ein Teilgebiet der physikalischen Chemie, welches sich mit den Eigenschaften, der Herstellung und Anwendung von Radionukliden beschäftigt. Praktische Anwendung findet die Radiochemie in der analytischen Chemie, Biochemie und Medizin zur Aufklärung von Synthese- bzw. Stoffwechselwegen durch radioaktiv markierte Verbindungen.

1. Radiochemie

1.1. Methoden

Aufgaben: Die Entdeckung neuer radioaktiver Substanzen und Entwicklung praktischer Anwendungen.

Charakteristika: Der Umgang mit unwägbaren Mengen. Seltene chemische Elemente bis hin zu einzelnen Atomen werden nachgewiesen und ihre Eigenschaften beschrieben.

Problem: Wie kann eine unwägbare Substanz rein abgetrennt oder rein ausgeschlossen werden? Die analytischen Methoden der Curies bezeichnen den Beginn der Radiochemie.

1.1.1. Fraktionierte Kristallisation oder Fällung

Diese Methode wird zur **Trennung zweier chemisch sehr verwandter Elemente** verwendet. Zur Anreicherung bzw. Abreicherung wird die unterschiedliche Löslichkeit genutzt. In der Fachliteratur wird immer auf die "Methode der Mme Curie zur Radiumanreicherung" verwiesen. Bei Marie Curie kann man in "Untersuchungen über die radioaktiven Substanzen" von 1904 nachlesen, wie das gemacht wird.

Radiumhaltiges Bariumchlorid wird in Wasser gelöst und zur Sättigung eingekocht. Dann lässt man in einer offenen Schale abkühlen. Die Mutterlauge kann von den am Boden haftenden Radiumchlorid-Kristallen leicht getrennt werden. Diese Lösung hat jetzt eine fünfmal geringere Aktivität als der Niederschlag. Mit beiden Teilen wird diese Prozedur wiederholt, sodass man vier Portionen hat. Die beiden schwächsten werden vereinigt. Diese drei werden wieder gelöst, eingeengt und auskristallisiert. Dabei wird die Mutterlauge der einen auf die Kristalle der nächsten Portion gegossen. Die stärkste und die schwächste werden aus dem Verfahren entfernt. Mit abnehmender Substanzmenge nimmt die Aktivität zu. Um das Volumen zu vergrößern, gibt man zunehmend Salzsäure dazu. Irgendwann nimmt man die schwächste Portion heraus und gibt eine Portion der Radiumchlorid-Ernte wieder herein und fraktioniert weiter, bis man in der Kopffraktion reines Radiumchlorid hat.

1.1.2. Mitfällung durch Trägersubstanzen

Auch dies ist ein Verfahren, um unwägbarere Mengen radioaktiver Substanzen zu untersuchen. 1913 wurde erforscht, wie sich unwägbarere Substanzmengen bei Anwesenheit anderer, aber wägbarer Substanzen verhalten. Die Frage war, ob und unter welchen Umständen sie an einem Niederschlag **adsorbiert** werden oder ob sie im Filtrat bleiben. Es wurden Fällungs- und Adsorptionsregeln formuliert:

"Von einem Ionengitter werden diejenigen Ionen relativ gut adsorbiert, deren Verbindung mit dem entgegengesetzt geladenen Bestandteil des Gitters in dem betreffenden Lösungsmittel schwer löslich ist." Dies wurde 1926 von *Hahn* ergänzt: "Ein Element wird aus beliebig großer Verdünnung mit einem kristallisierenden Niederschlag dann ausgefällt, wenn es in das Kristallgitter des Niederschlags eingebaut wird, also **Mischkristalle** mit den Ionen des kristallisierenden Niederschlags bildet. Tut es dies nicht, dann bleibt es im Filtrat, auch wenn seine Verbindung mit dem entgegengesetzt geladenen Bestandteil des Gitters in dem betreffenden Lösungsmittel beliebig schwer löslich ist. "

Die Mischkristallbildung kann je nach Löslichkeitsunterschieden der Komponenten verschieden sein. Die Mischkristallbildung kann nach Hahn normal (gesetzmäßig), anormal oder zufällig sein. Für eine quantitative Mitfällung ist also die **Wahl des geeigneten Trägers** entscheidend.

Die Trennmethode beruht darauf, dass chemisch eng verwandte Elemente zusammen ausgefällt werden (weil sie beide z.B. wie im Fall Ba und Ra zweiwertig sind). Verschwindend kleine Mengen können so mit einer Trägersubstanz aus einer Mischung "herausgeholt" werden. Im Dezember 1938 wurde von Hahn und Straßmann das vermutete Ra aus dem bestrahlten Uran vermischt mit natürlichem Radium (als Indikator für das Verhalten von Radium bei der fraktionierten Kristallisation) und nicht radioaktivem Ba als Trägersubstanz. Dann wurde durch Zugabe von Bariumbromid auskristallisiert. Der Kontrollversuch mit natürlichem Radium zeigte eine starke Anreicherung in der ersten Auskristallisation, während das vermutete künstliche Radium bei allen Durchgängen gleich verteilt blieb. Dies äußerte sich in den gemessenen Aktivitäten, die gleich blieben, anstatt anzusteigen. Fazit: das künstliche "Radium" ist keines, sondern Barium.

1.1.3. Indikatormethode

Dieses Verfahren beruht darauf, dass man inaktive oder sehr schwach aktive chemische Elemente durch ihre stark aktiven oder sonst wie leicht nachweisbaren Isotope in Konzentrationen erkennen und bestimmen kann, die sich dem gewöhnlichen chemischen Nachweis entziehen. Ein Indikator-Isotop (Tracer-Substanz) genau bekannter Aktivität wird zu der zu untersuchenden Substanz zugegeben. Bei Hahn wurde beispielsweise Anfang 1939 bei den Indikatorversuchen das Radium-Isotop "Mesothor I" verwendet, welches selbst vor dem Einsatz noch langwierig von einem anderen Isotop abgetrennt werden muss. Mit Hilfe dieser **Markierung** können vorhandene Isotope nachgewiesen bzw. nicht vorhandene ausgeschlossen werden. Mit dieser Methode können auch lange Halbwertzeiten untersucht werden.

1.1.4. Emaniermethode

Radioaktive Gase, z.B. Radon, dienen als Indikator für **Oberflächenbeschaffenheit** und **Oberflächenänderungen** von Substanzen. Dafür werden die Muttersubstanzen der aktiven Gase, entweder Radium- oder Thoriumisotope, in der zu untersuchenden Substanz in kleiner Menge homogen verteilt.

Oberflächenreiche Präparate geben ihr Radon zu einem sehr erheblichen Teil ab. Altern sie jedoch, dann wird ihre Oberfläche kleiner und entsprechend bleibt zunehmend mehr Radon im Präparat stecken. Dann nimmt die Aktivität zu.

Aufgrund dieses Alterungsprozesses können Oberflächenveränderungen durch Temperaturänderungen, chemische Reaktionen u.a.m. in ihrem Verlauf geprüft werden. Es werden in den zu untersuchenden Festkörper Substanzen eingebracht, aus denen Radon entsteht. Man kann auch andere Edelgase erzeugen.

1.2. Anwendungen

Hahn 1958: "Die Nutzbarmachung der in den Atomen schlummernden Energie war in den Bereich des Möglichen gebracht, durch Anlagen, in denen die Kettenreaktion in gebändigter, kontrollierter Form wertvollste radioaktive Spaltprodukte in praktisch beliebig großer Menge zu gewinnen erlaubt und wo die frei werdende Energie als Wärme und deren Überführung in elektrischen Strom die bisherigen Energiequellen, Kohle und Erdöl, wird ersetzen können." Gemeint ist also die friedliche Verwendung der Atomenergie zur Gewinnung von Strom und zur Herstellung künstlich radioaktiver Atomarten. Die aktiven Substanzen finden Verwendung als Strahlenquellen und als Indikatoren für chemisches Verhalten. Strahlenquellen sind notwendig für medizinische Zwecke, z.B. der Krebsbehandlung. Im Vergleich zu früher hat sich der Preis pro Strahlungseinheit um das zweihunderttausendfache vermindert.

Für technische Zwecke sind Strahlungsquellen ebenfalls hilfreich. Beispiele:

- Dickenkontrolle verschiedenster Materialien
- Prüfung auf Leckstellen in Kabeln und Leitungssystemen
- Nachweis von Hohlräumen
- Markierung von Sonden in Pipelines
- γ -Strahlung zur Materialbearbeitung, z.B. Vernetzung von Polymeren
- Radioaktive Behandlung von Lebensmitteln zur Konservierung

In biochemischen Verfahren spielen Indikatormethoden oft eine Rolle. Als Leit-Isotop wird beispielsweise C^{14} zur Erforschung biochemischer Prozesse in das zu untersuchende Gewebe eingebaut. Zu nennen sind noch die Geochemie bzw. die Kosmochemie, wo es um die Entstehung der Elemente und deren Verteilung auf der Erde und im Universum geht. Hierunter fällt auch der Bereich der Altersbestimmungen.

2. Kernchemische Grundlagen

2.1. Nuklide

2.1.1. Stabilität

Siehe hierzu die "Nuklidkarte". 1969 waren bei 104 Elementen über 1300 Nuklide bekannt. 270 davon sind stabil. Von diesen sind die mit gerader Protonen- und Neutronen-Zahl weitaus am häufigsten. Es gibt die Möglichkeiten ug (ungerade, gerade), gu, gg und uu. Eine Regel besagt, dass es keine benachbarten stabilen **Isobaren** gibt. Das sind Kerne mit gleicher Nukleonenzahl, die sich jedoch in der Anzahl ihrer Protonen und Neutronen unterscheiden, z.B. ^{25}Al , ^{25}Mg , ^{25}Na . Stabil ist nur ^{25}Mg . So entsteht die 'Treppenform' der Nuklidkarte.

Natürliche radioaktive Kerne kommen deshalb vor, weil sie sehr langsam zerfallen und die kurzlebigeren unter ihnen sind noch nicht ausgestorben, weil sie aus den langlebigen ständig nachgebildet werden. Siehe hierzu die Übersicht "Natürliche Zerfallsreihen". α -Aktivität kommt fast nur bei Ordnungszahlen größer als 83 (Bi) vor. Diese schweren Kerne können dadurch einen Teil ihrer überschüssigen Masse abgeben. Darunter gibt es fast nur β -Strahler.

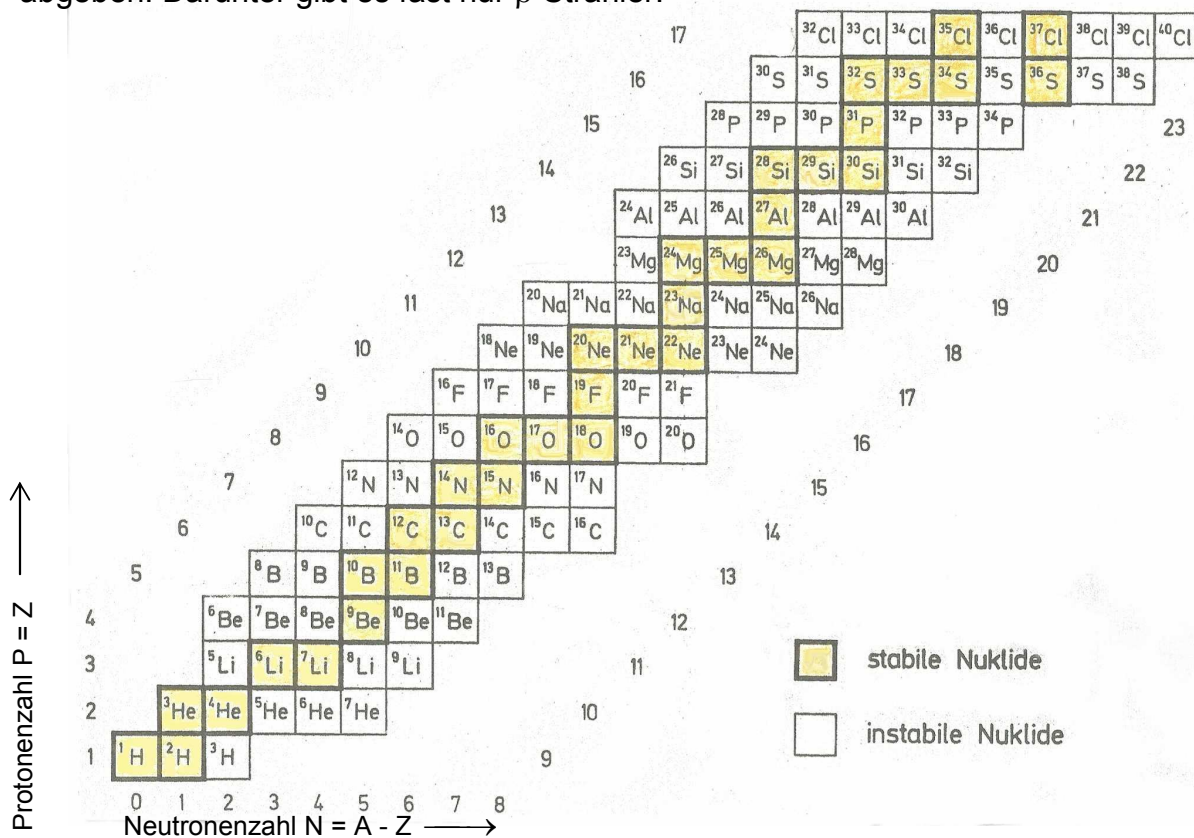


Abb. 2 Nuklidkarte der ersten 17 Elemente

2.1.2. Natürliche Zerfallsreihen

Diejenigen radioaktiven Nuklide, die in einem genetischen Zusammenhang stehen, gehören einer Zerfallsreihe ("Familie") an. Es sind insgesamt vier verschiedene Zerfallsreihen möglich, deren Massenzahlen den Formeln $A=4n$, $A=4n+1$, $A=4n+2$ und $A=4n+3$ entsprechen. 'n' ist eine ganze Zahl, die mit jedem α -Zerfall um eins absteigt, z.B. ^{238}U : $A = 4 \cdot 59 + 2$, Tochternuklid ^{234}Th : $A = 4 \cdot 58 + 2$. Drei Zerfallsreihen wurden bei der Aufklärung der natürlichen Radioaktivität gefunden. $A=4n+1$ kommt nicht in der Natur vor. Siehe die folgenden Abbildungen.

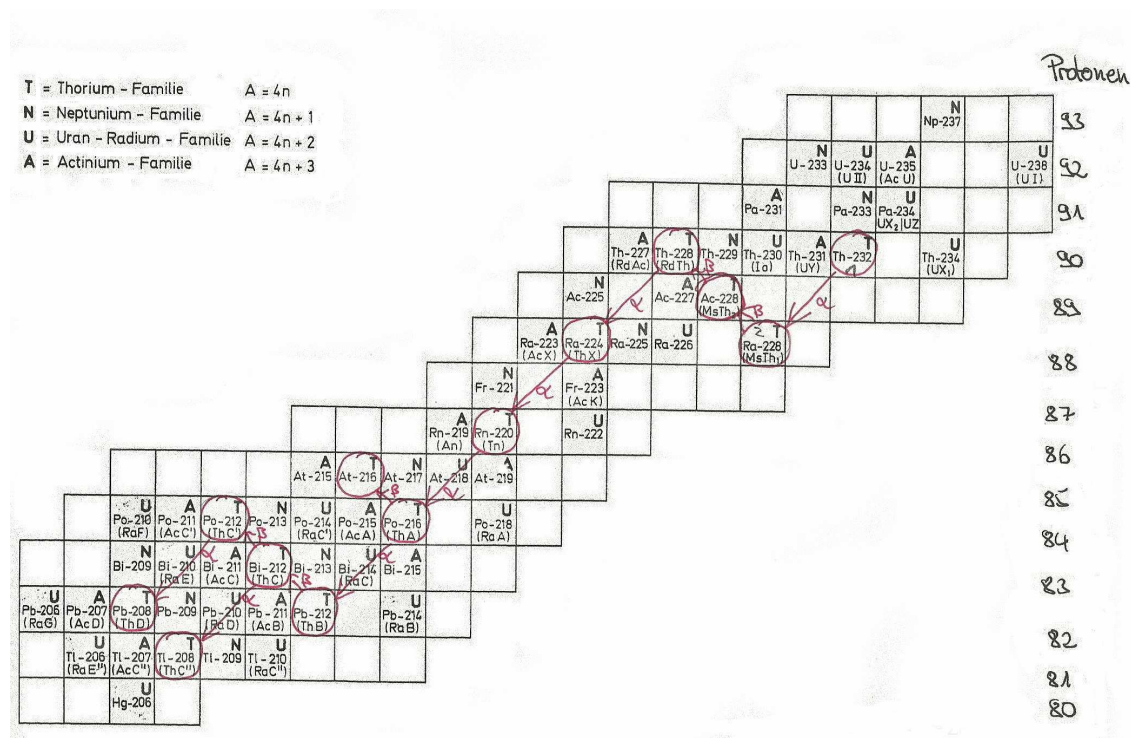


Abb. 3 Nuklidkarte mit Zerfallsreihen

Alle Zerfallsreihen befinden sich im oberen Teil der Nuklidkarte. Beispielfhaft ist die Thorium-Familie (T) rot nachgezeichnet. In Klammern sind auch die historischen Bezeichnungen der Isotope angegeben. Beispielsweise ist das oben genannte 'Mesothor I' ein Radium-Isotop (Ra^{228}). Auch von 'Thor X' und 'UZ' ist in den Briefen von Hahn und Meitner oft die Rede. Hier kann man sehen, um welche Isotope es sich dabei handelt. Diese Bezeichnungen entstanden aus den Zerfallsreihen:

Thor \rightarrow Mesothor I \rightarrow Mesothor II \rightarrow Radiothor \rightarrow Thor X \rightarrow Thor A \rightarrow Thor B \rightarrow Thor C

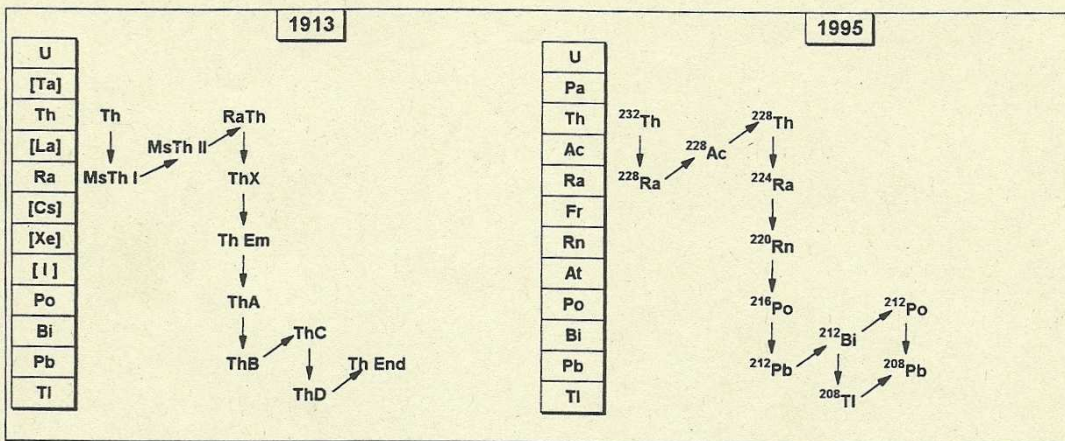


Fig. 2. The $4n$ radioactive family in 1913 and 1995.

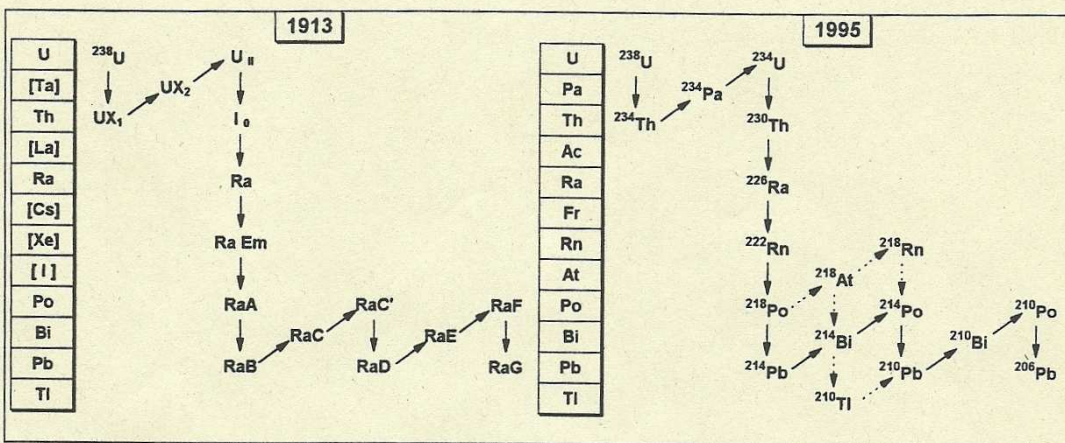


Fig. 3. The $4n + 2$ radioactive family in 1913 and 1995. Dotted arrows indicate minor branchings.

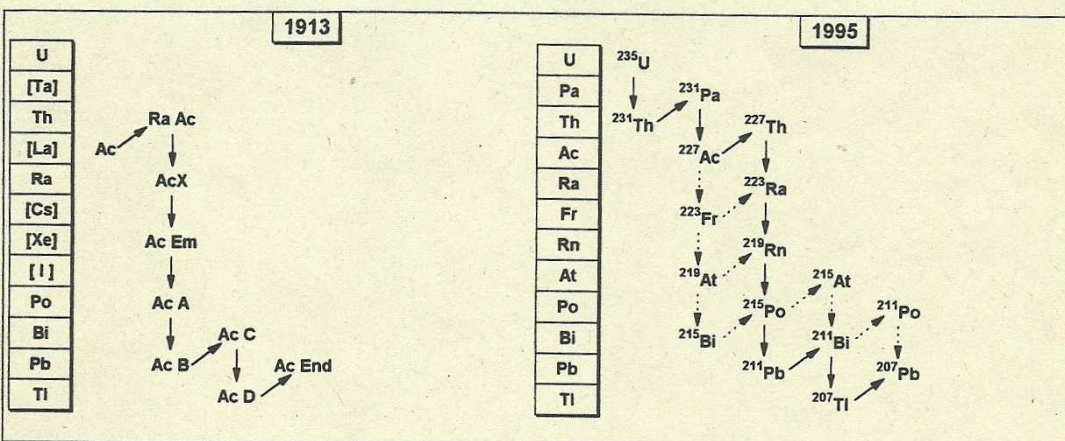


Fig. 4. The $4n + 3$ radioactive family in 1913 and 1995. Dotted arrows indicate minor branchings.

Abb. 4 Natürliche Zerfallsreihen

Durch α -Zerfall entsteht ein Element, welches zwei Protonen und zwei Neutronen weniger hat, als die Muttersubstanz. Durch β -Zerfall entsteht ein Element, das eine Ordnungszahl über der Muttersubstanz liegt (mit gleicher Nukleonenzahl).

Die folgenden Tabellen zeigen die **Eigenschaften** der Mitglieder aller vier Zerfallsreihen. Man beachte dabei auch die sehr unterschiedlichen Halbwertszeiten. Jede Zerfallsreihe endet mit einem stabilen Nuklid.

Tabelle 5.1.
Thorium-Familie ($A = 4n$)

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Maximale Energie der Strahlung in MeV
^{232}Th	$1,41 \cdot 10^{10} \text{ a}$	α	4,01
^{228}Ra (MsTh ₁)	6,7 a	β	0,05
^{228}Ac (MsTh ₂)	6,13 h	β	2,11
^{228}Th (RdTh)	1,91 a	α	5,43
^{224}Ra (ThX)	3,64 d	α	5,68
^{220}Rn (Tn)	55 s	α	6,29
^{216}Po (ThA)	0,15 s	α	6,78
^{212}Pb (ThB)	10,64 h	β	0,58
^{212}Bi (ThC)	60,6 min	α, β	$\alpha : 6,09; \beta : 2,25$
^{212}Po (ThC')	$3,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}$	α	8,78
^{208}Tl (ThC'')	3,10 min	β	1,80
^{208}Pb (ThD)		stabil	

Tabelle 5.2.
Neptunium-Familie ($A = 4n + 1$)

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Maximale Energie der Strahlung in MeV
^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6 \text{ a}$	α	4,78
^{233}Pa	27,0 d	β	0,26
^{233}U	$1,62 \cdot 10^5 \text{ a}$	α	4,82
^{229}Th	$7,34 \cdot 10^3 \text{ a}$	α	4,84
^{225}Ra	14,8 d	β	0,36
^{225}Ac	10,0 d	α	5,83
^{221}Fr	4,8 min	α	6,34
^{217}At	0,032 s	α	7,07
^{213}Bi	47 min	α^1, β	$\alpha : 5,87; \beta : 1,39$
^{213}Po	$4 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	α	8,38
^{209}Tl	2,2 min	β	1,99
^{209}Pb	3,3 h	β	0,64
^{209}Bi		stabil	

Die Isotope der Neptunium-Reihe haben keine historischen Bezeichnungen

Tabelle 5.3.
Uran-Radium-Familie ($A = 4n + 2$)

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Maximale Energie der Strahlung in MeV
^{238}U (UI)	$4,51 \cdot 10^9$ a	α	4,20
^{234}Th (UX ₁)	24,1 d	β	0,19
$^{234\text{m}}\text{Pa}$ (UX ₂)	1,17 min	β	2,29
^{234}Pa (UZ)	6,75 h	β	0,53
^{234}U (U II)	$2,47 \cdot 10^5$ a	α	4,77
^{230}Th (Io)	$8,0 \cdot 10^4$ a	α	4,68
^{226}Ra	1 602 a	α	4,78
^{222}Rn	3,82 d	α	5,49
^{218}Po (RaA)	3,05 min	$\alpha, \beta^{1)}$	$\alpha : 6,00$
^{214}Pb (RaB)	26,8 min	β	1,03
^{218}At	≈ 2 s	α	6,70
^{214}Bi (RaC)	19,7 min	$\alpha, ^{1)}\beta$	$\alpha : 5,51; \beta : 3,26$
^{214}Po (RaC')	$1,64 \cdot 10^{-4}$ s	α	7,69
^{210}Tl (RaC'')	1,3 min	β	2,3
^{210}Pb (RaD)	21 a	$\alpha^{1)}, \beta$	$\alpha : 3,72; \beta : 0,061$
^{206}Hg	8 min	β	1,3
^{210}Bi (RaE)	5,0 d	$\alpha^{1)}, \beta$	$\alpha : 4,69; \beta : 1,16$
^{206}Tl (RaE'')	4,19 min	β	1,52
^{210}Po (RaF)	138,4 d	α	5,31
^{206}Pb (RaG)		stabil	

Tabelle 5.4.
Actinium-Familie ($A = 4n + 3$)

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Maximale Energie der Strahlung in MeV
^{235}U (AcU)	$7,10 \cdot 10^8$ a	α	4,58
^{231}Th (UY)	25,5 h	β	0,30
^{231}Pa	$3,25 \cdot 10^4$ a	α	5,02
^{227}Ac	22 a	$\alpha^{1)}, \beta$	$\alpha : 4,95; \beta : 0,046$
^{227}Th (RdAc)	18,2 d	α	6,04
^{223}Fr (AcK)	22 min	$\alpha^{1)}, \beta$	$\alpha : 5,35; \beta : 1,15$
^{223}Ra (AcX)	11,43 d	α	5,75
^{219}At	0,9 min	$\alpha, \beta^{1)}$	$\alpha : 6,28$
^{219}Rn (An)	4,0 s	α	6,82
^{215}Bi	7 min	β	
^{215}Po (AcA)	$1,8 \cdot 10^{-3}$ s	$\alpha, \beta^{1)}$	$\alpha : 7,38$
^{211}Pb (AcB)	36,1 min	β	1,36
^{215}At	10^{-4} s	α	8,01
^{211}Bi (AcC)	2,15 min	$\alpha, \beta^{1)}$	$\alpha : 6,62$
^{211}Po (AcC')	0,52 s	α	7,45
^{207}Tl (AcC'')	4,79 min	β	1,44
^{207}Pb (AcD)		stabil	

2.1.3. Kernisomerie

Gleiche Nuklide mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften (**verschiedene Halbwertszeit** und **Strahlungsenergie**) heißen Isomere. Es handelt sich dabei um verschiedene Energiezustände desselben Nuklids. Der Übergang vom angeregten Zustand des Atomkerns zum Grundzustand ist blockiert, deshalb hat der angeregte Zustand eine gewisse Halbwertszeit, die zwischen dem Bruchteil einer Sekunde und vielen Jahren liegen kann. Oft ist die Halbwertszeit des angeregten Zustandes größer als die des Grundzustandes.

2.2. Kerneigenschaften

Durchmesser des Atoms: 10^{-8} cm

Durchmesser des Kerns: 10^{-13} bis 10^{-12} cm

Dichte des Kerns: 10^{14} g/cm³ (10^8 t/cm³)

2.2.1. Kernkraft

Die Kernkraft ist unabhängig von der Ladung der Nukleonen. Sie wirkt fast nur auf die unmittelbaren Nachbarn, also im Bereich 10^{-13} cm.

Die **Bindungsenergie BE** setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen:

- der Volumenenergie E_v (gegenseitige Anziehung der Nukleonen)
- der Oberflächenenergie E_f (verminderte Bindung der Oberflächennukleonen)
- der Coulombenergie E_C (Verminderung der Bindungsenergie durch Abstoßung der Protonen)
- der Symmetrienergie E_s (Verminderung durch Neutronenüberschuss)
- der Paarungsenergie E_δ (gerade-ungerade-Regel: Verminderung bei uu, Verstärkung bei gg)

Siehe dazu die Abbildungen "Bindungsenergien"

1. Periodensystem der Elemente und Nuklidkarte

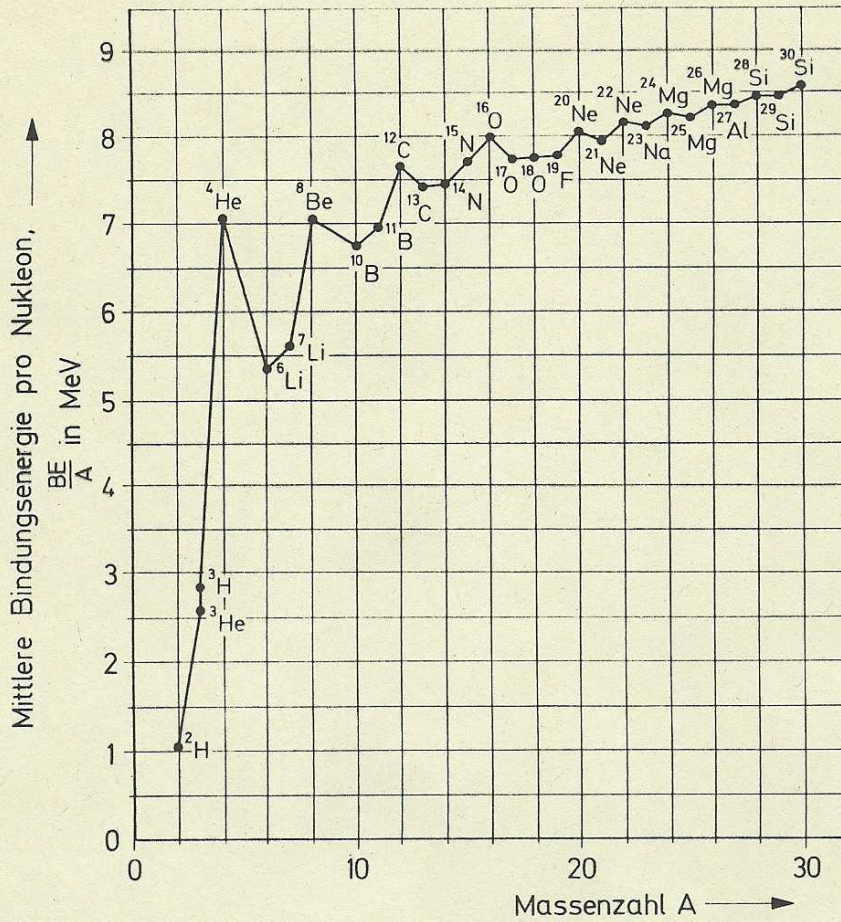


Abb. 5 Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon für die leichteren Elemente

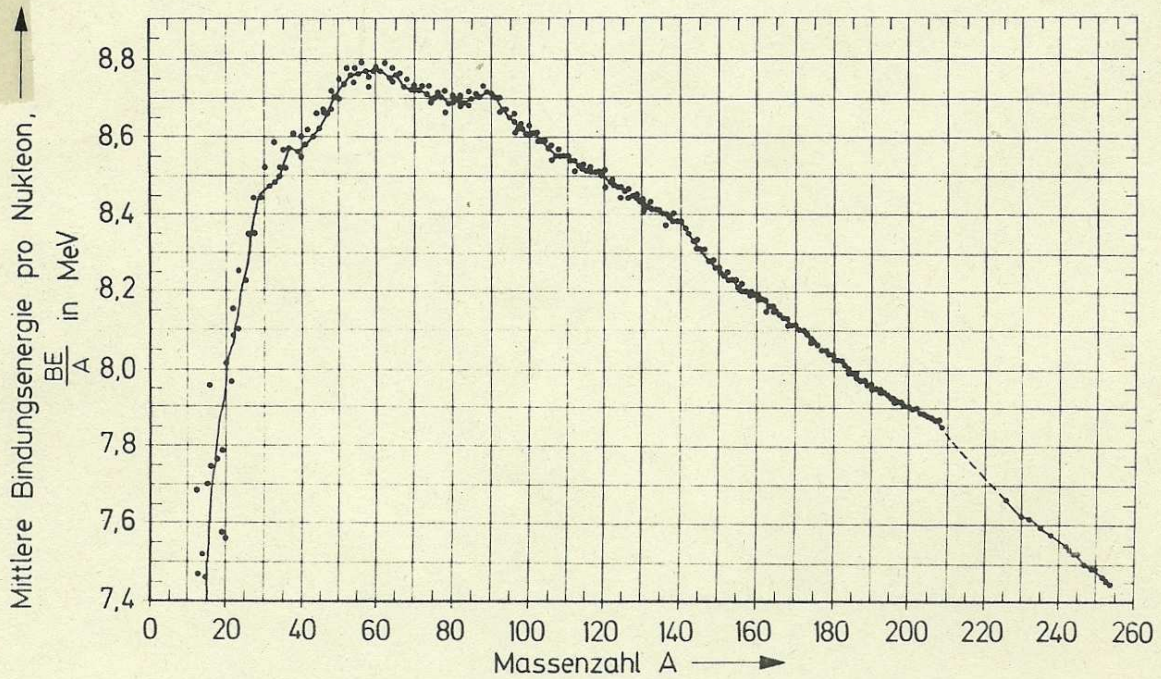


Abb. 6 Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon für mittelschwere und schwere Nuklide

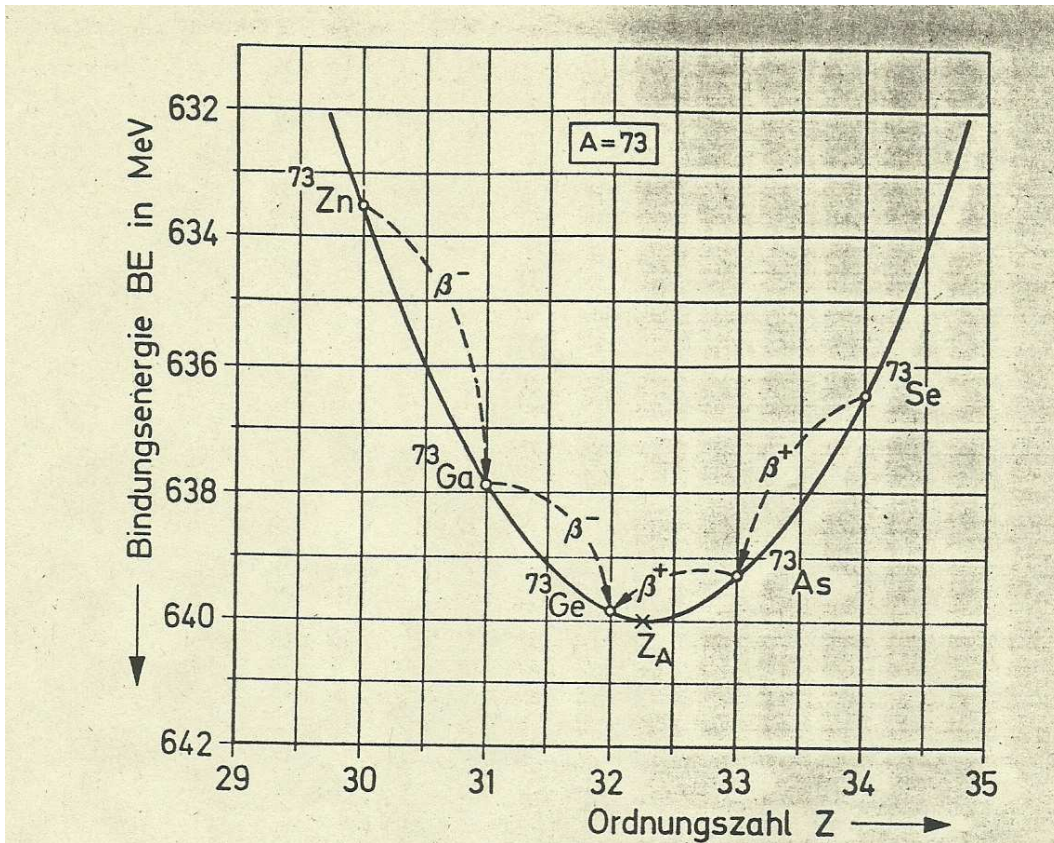


Abb.7 Bindungsenergien u. radioaktiver Zerfall für Nuklide mit ungerader Massenzahl ($A = 73$)

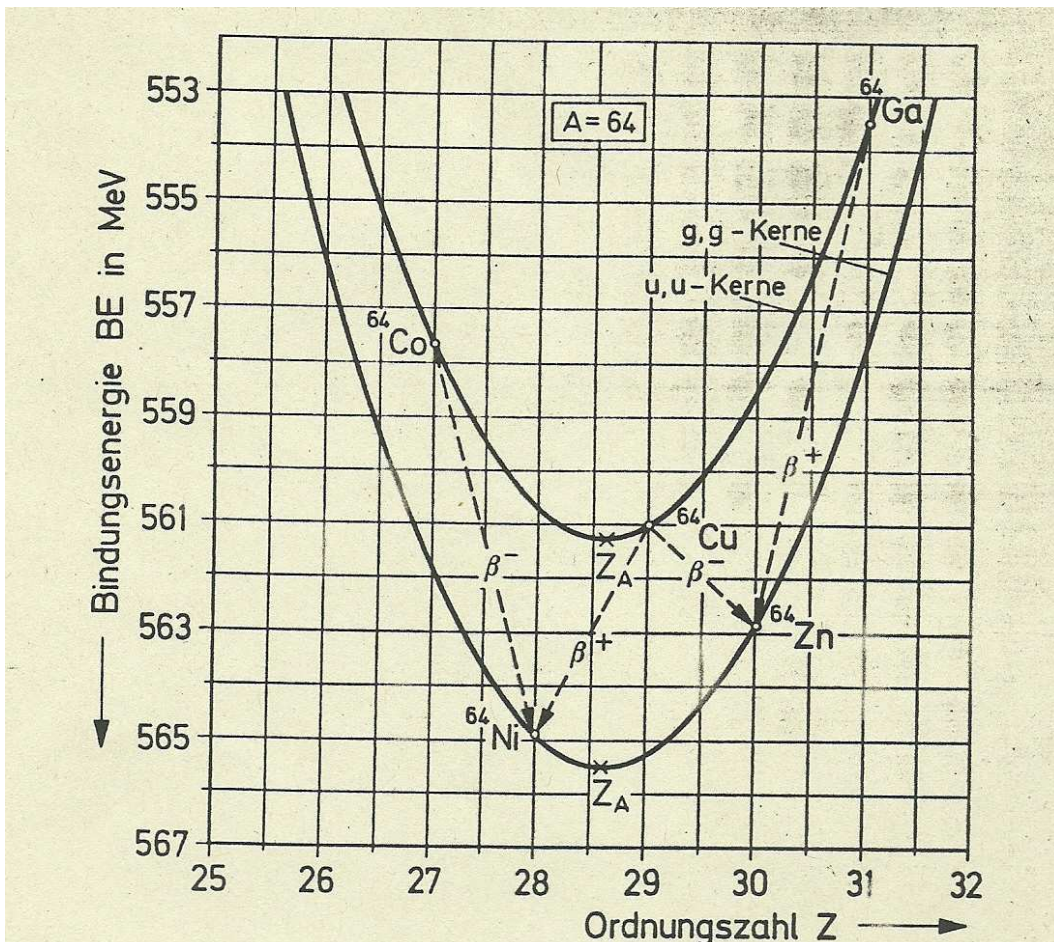


Abb. 8 Bindungsenergien und radioaktiver Zerfall für Nuklide mit gerader Massenzahl ($A=64$)

2.2.2. Massenzahl - Nuklidmasse - Massendefekt

Massenzahl A: Sie ist bestimmt durch die Anzahl der Nukleonen. Sie ist immer ganzzahlig.

Nuklidmasse: Damit ist die wahre Masse gemeint, d.h. einschließlich der Elektronen. Sie wird in der Einheit 'u' angegeben.

Massendefekt: Differenz zwischen der Masse eines Kerns und der Summe der Massen der Nukleonen, aus denen er sich zusammensetzt. Die Bindungsenergie ist gleich dem Massendefekt multipliziert mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit:

$$E = m \cdot c^2$$

2.2.3. Kernmodelle

Tröpfchenmodell (LDM): Es wird von einer starken Wechselwirkung der Nukleonen ausgegangen (Siehe Abb. Bindungsenergien). Wie weiter oben gesehen, setzt sich die Bindungsenergie aus mehreren Komponenten zusammen, die zum Teil entgegengesetzt wirken. Insgesamt sind die anziehenden Kräfte stärker als die abstoßenden. Den Kern stellt man sich wie einen Wassertropfen vor, der inkompressibel ist und eine Oberflächenspannung hat. Wird er von einem Geschoss getroffen, so entsteht ein Zwischenkern, der in einem Übergangszustand aus einem Verbund aus Kern und Geschoss besteht (compound nucleus). In einer oszillierenden Deformationsbewegung vergrößert sich das Volumen, wodurch die abstoßenden Kräfte im Kern die Oberhand gewinnen können. Wenn sie einen bestimmten Energiebetrag (die 'Spaltbarriere') übersteigen, kommt es zur Abspaltung von größeren Kernteilen. Das LDM erklärt aber nicht die angeregten Zustände, die Kernisomeren.

Schalenmodell: Es basiert auf der Tatsache, dass bei bestimmten Protonenzahlen und Neutronenzahlen besonders viele stabile Nuklide auftreten. Diese Zahlen sind 2, 8, 20, 50, 82, 126 (magische Zahlen). Nach dieser Vorstellung sind die Protonen und Neutronen innerhalb des Kerns in Schalen angeordnet, ähnlich wie die Elektronen in der Atomhülle. Es wird angenommen, dass die Nukleonen sich auf bestimmten Bahnen bewegen, die durch das von der Gesamtheit der Nukleonen erzeugte Potential bestimmt sind. Die Wechselwirkung zwischen den Nukleonen wird

dabei als untergeordnet angenommen. Es wird deshalb als Modell der unabhängigen Teilchen bezeichnet.

Beide Modelle stehen in starkem Gegensatz zueinander. Trotzdem sucht man nach einem übergeordneten Modell, das Kollektivmodell. Danach besitzt der Kern eine Schalenstruktur, die zur Oszillation befähigt ist.

2.3. Kernumwandlungen

2.3.1. Mononuklear

Allgemeine Reaktionsgleichung: $A \longrightarrow B + x + \Delta E$

2.3.1.1. Energetik

Worin ist die Ursache für den Zerfall zu sehen? Weshalb besitzen die instabilen Nuklide so unterschiedliche Halbwertzeiten?

Die Antwort ist immer: Es wird Energie frei. Dadurch nähern sich die Nuklide dem letztlich angestrebten energieärmsten Zustand, der stabil ist.

Der Kern A kann ganz bestimmte angeregte Energiezustände annehmen. Der radioaktive Zerfall ist aber erst dann möglich, wenn seine Energie größer ist, als eine bestimmte **Schwellenenergie** E_s . Diese Schwellenenergie entspricht der Aktivierungsenergie einer chemischen Reaktion. Je größer E_s für den Zerfall ist, umso kleiner ist die Wahrscheinlichkeit eines Zerfalls.

Diese Betrachtung trifft aber nicht in allen Fällen zu, z.B. der α -Zerfall. Hier zerfällt der Kern nicht durch Erreichen einer Energieschwelle.

2.3.1.2. α - Strahlen

α -Teilchen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen, die besonders fest aneinander hängen. Siehe Abb. 5 die besonders hohe Bindungsenergie von ${}^4\text{He}$. Sie sind also Heliumkerne. Diese Strahlungsart kommt nur bei schweren Kernen vor. Kennzeichnend ist die sehr starke Wechselwirkung mit der Materie. Zigarettenpapier oder einige Zentimeter Luft genügen zur vollständigen Absorption. Sie wirkt stark

ionisierend. Die Reichweite aller α -Teilchen ist gleich lang. Je nach Nuklid reicht sie in Luft von 3,5 cm bis knapp 12 cm.

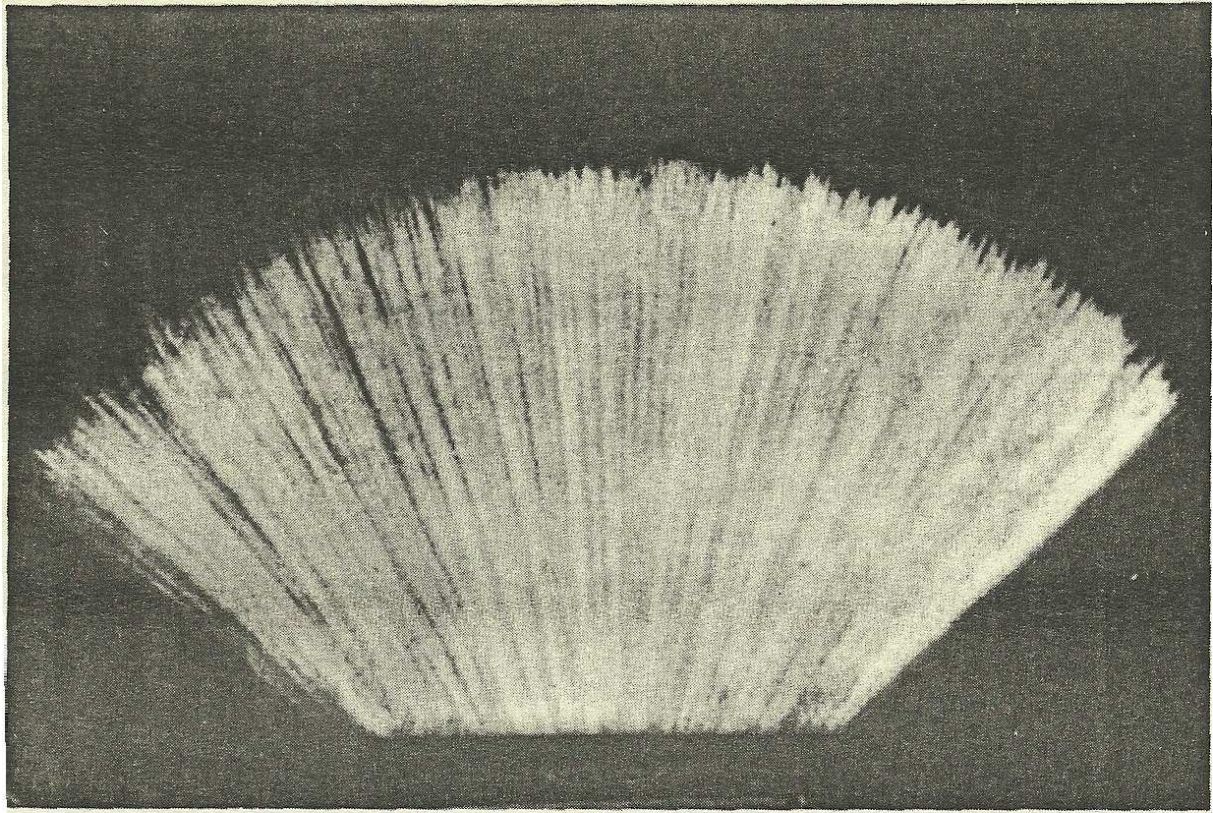


Abb. (6-2) α -Strahlen in einer Nebelkammer. Aus K. PHILIPP: Naturwissenschaften 14 (1926) 1203.

Abb. 9

Theorie: Das α -Teilchen wird innerhalb vom Kern durch die starken Kernkräfte gebunden. Das ergibt eine negative potentielle Energie, d.h. negative y-Werte im 'Potentialtopf'. Siehe Abb. 10.

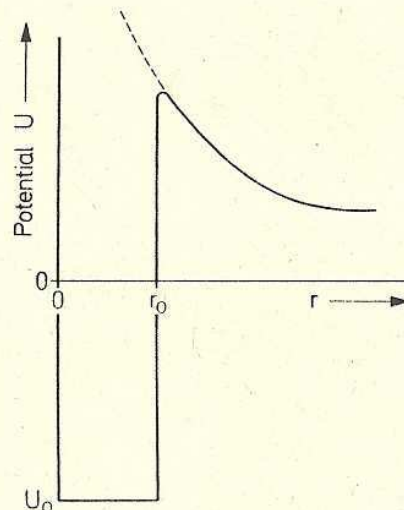


Abb. 10

Abb. (2-2) Potentialkurve für die Reichweite der Kernkräfte (Potentialtopf).

Für den gesamten Durchmesser ergibt sich daraus als schematische Darstellung ein 'Vulkan':

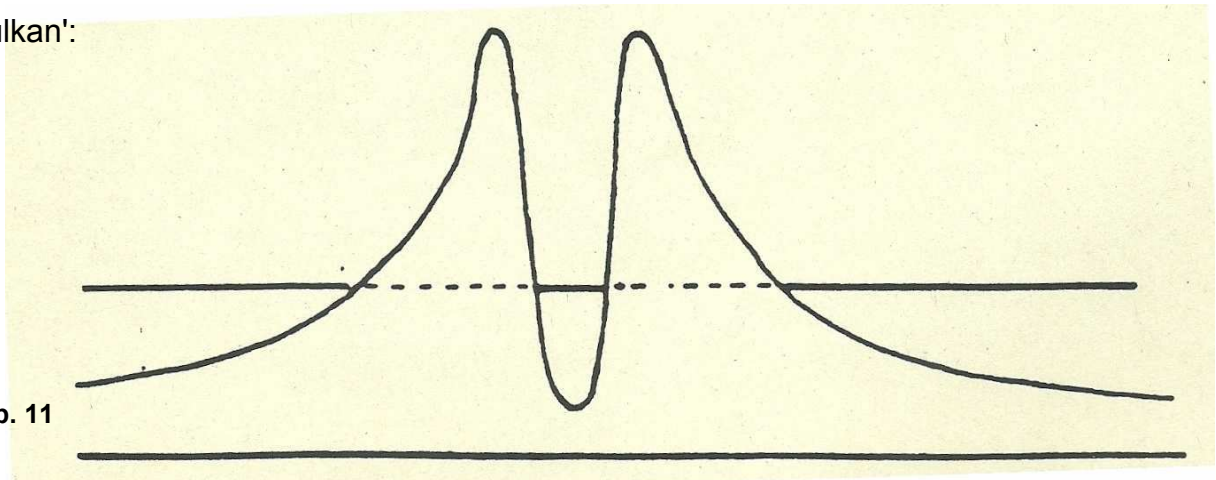


Abb. 11

Außerhalb des Kerns (r_k) wird es wegen seiner positiven Ladung abgestoßen. Das α -Teilchen **besitzt allerdings nicht genügend Energie**, um die Potentialschwelle zu erreichen. Das es aber doch herauskommt und mit Energien, die oft kaum die Hälfte der Potentialschwelle von mindestens 9 MeV entsprechen, widerspricht den Vorstellungen der klassischen Mechanik.

Das Problem wurde 1928 von *Gamov* quantenmechanisch mit Hilfe der **Schroedinger-Gleichung** gelöst. Das Teilchen wird dabei als **Welle** aufgefasst, die bei Auftreffen auf die Potentialschwelle in ihrer Amplitude gestört wird, dabei aber ihre Richtung beibehält und anschließend mit einer sehr kleinen Amplitude außerhalb des Potentialbereichs, also außerhalb des Kerns wieder als Welle austritt. Die Tatsache, dass ein solcher Wellenverlauf berechenbar ist, bedeutet, dass es eine Wahrscheinlichkeit größer als Null gibt, dass ein α -Teilchen auch mit einer geringeren Energie den Kern verlässt, (**Tunneleffekt**). Siehe Abb. 12. Dies ist offenbar der leichtere, energetisch bevorzugte Weg.

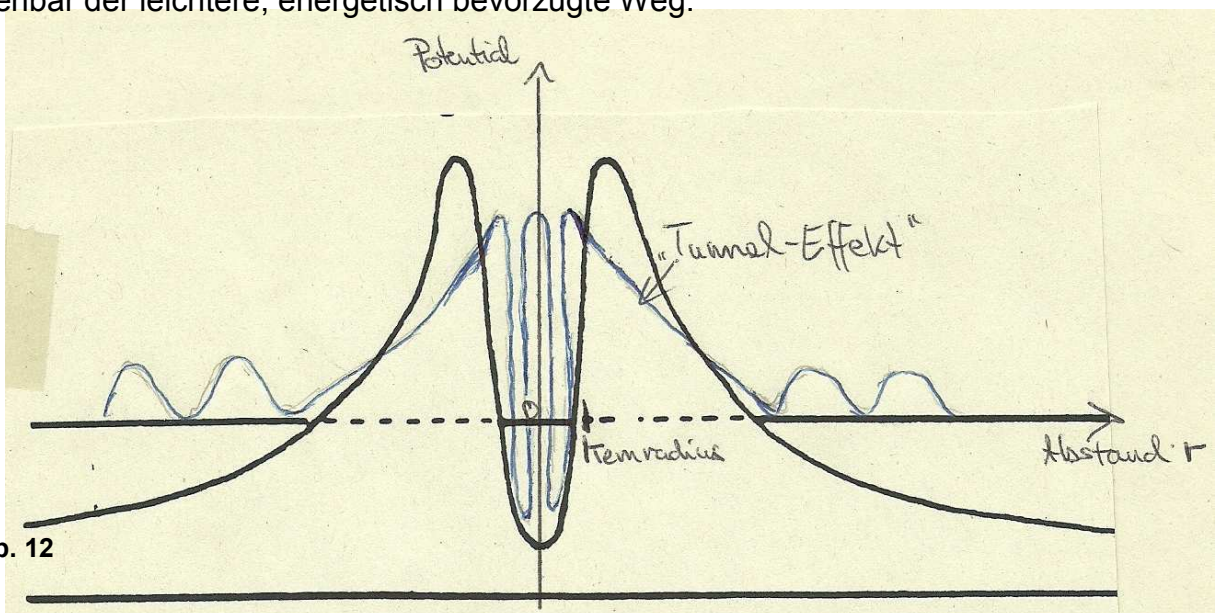


Abb. 12

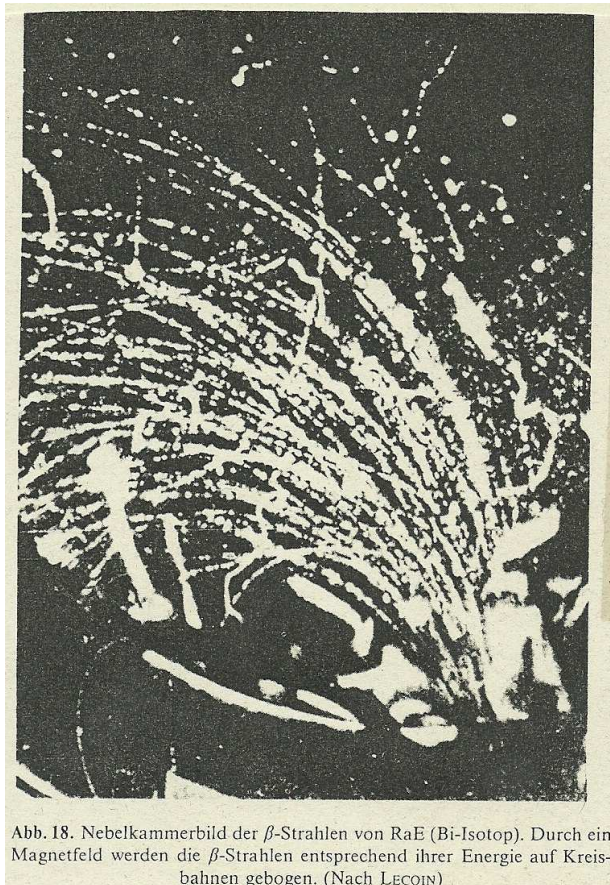
In den dreißiger Jahren war es undenkbar, dass ein größeres Teilchen tunneln könnte. Denn für größere Kernfragmente wächst die Potentialschwelle sehr stark an und macht so das Tunneln äußerst unwahrscheinlich.

Später aber wurde diese Vorstellung auch auf die Spontanspaltung angewendet.

2.3.1.3. β - Strahlen

Ihre Wechselwirkung mit der Materie ist wesentlich geringer und wirkt wesentlich weniger ionisierend. Die Reichweite in Luft beträgt etwa 10 m. Im Magnetfeld ist die Strahlung leicht ablenkbar, wie das Nebelkammerbild zeigt:

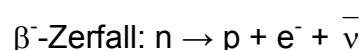
Abb. 13



Der β -Zerfall ist **die Emission eines Elektrons** aus dem Kern. Ein Neutron zerfällt in ein Proton und ein Elektron. Betrachtet man β -Strahlen auf einem Nebelkammerbild so sieht man, dass die abgelenkten Strahlen weit aufgefächert werden, entsprechend den verschiedenen Geschwindigkeiten (Energien). Man sieht, die Elektronen können nach dem Kernaustritt jeden beliebigen Energiebetrag bis zu einer Maximalenergie haben. Das führt zu einer **kontinuierlichen Energieverteilung**. Jedoch müssten sie eigentlich alle den Maximalbetrag haben. Wo bleibt die restliche Energie?

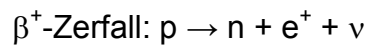
1930 postulierte Pauli ein neues

masseloses Elementarteilchen, das **Neutrino**. Beim β -Zerfall wird also je ein Elektron und ein Antineutrino ausgestoßen, die sich die Energie statistisch untereinander aufteilen.



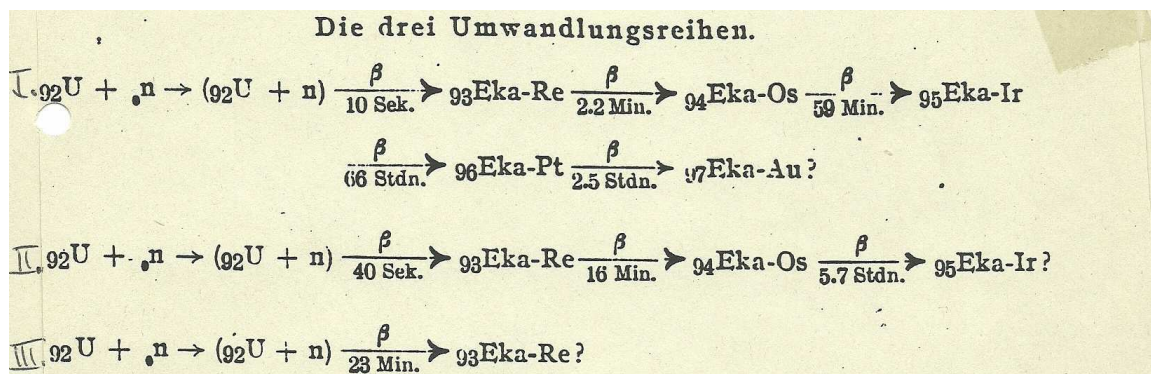
Ein Nuklid geht unter Aussendung eines **Elektrons** und eines **Antielektron-Neutrinos** in einen Tochterkern über, der eine um 1 erhöhte Ordnungszahl besitzt.

1932 wurde in der kosmischen Strahlung das Antiteilchen zum Elektron entdeckt, das **Positron**. 1933 gelangen Meitner die ersten Aufnahmen von Positronen in der Nebelkammer.



Ein Nuklid geht unter Aussendung eines **Positrons** und eines **Elektron-Neutrinos** in einen Tochterkern über, der eine um 1 erniedrigte Ordnungszahl besitzt.

Später zeigte sich, dass die Spaltprodukte starke β -Strahlung aussenden, um ihren Neutronenüberschuss abzubauen. Noch 1937 wurden Hahn/Meitner durch β -strahlendes Uran in die Irre geleitet. Die Abbildung aus der Originalpublikation zeigt, wie sie sich die Bildung der "**Transurane**" vorstellten. Tatsächlich sind die Reihen I. und II. Spaltprodukte. Nur Reihe III. führt zu ${}_{93}\text{Eka-Rhenium}$ (Neptunium):



2.3.1.4. γ - Strahlen

Diese Strahlung hat eine sehr geringe Wechselwirkung mit der Materie, d.h. sie ist sehr durchdringend mit einer sehr großen Reichweite. Betonwände müssen mindestens einen Meter dick sein, um sie abzuschirmen. Obwohl die Strahlung ungeladen ist, wirkt sie stark ionisierend. Das liegt daran, dass die Elektronen sehr leicht weggerissen werden, wenn sie Energie absorbieren. Oder die γ -Strahlung gibt ihre Energie vollständig an ein Krafffeld des Kerns ab, sodass vorübergehend Elektronen und Positronen entstehen, die sich anschließend gleich wieder vernichten.

Zwischen γ -Strahlung und Röntgenstrahlung besteht kein wesentlicher Unterschied. Wie Licht gehören sie zu den elektromagnetischen Strahlungen. Man unterscheidet sie nach ihrer Herkunft. Die **Röntgenstrahlung** kommt aus der Elektronenhülle. Sie entsteht durch Veränderung des energetischen Zustands eines Elektrons oder durch Abbremsung eines energetisch hohen Elektrons in der Nähe von Atomkernen.

Die **γ -Strahlung** kommt aus dem Kern. Wenn ein Kern von einem angeregten Zustand in den Grundzustand übergeht. Diese Überschussenergie wird gewöhnlich in Form eines oder mehrerer Photonen abgegeben, während der Kern vom angeregten Zustand in seinen Grundzustand niedrigster Energie übergeht.

Licht-Strahlung: Um ein Elektron anzuregen braucht man nur kleine Energien. Die Energie aus dem Atomkern ist aber viel größer. Das hat zur Folge, dass die emittierten Photonen sehr viel energiereicher sind. Licht hat üblicherweise eine Energie von etwa 5 eV, bei γ -Strahlung werden 20 MeV frei. γ -Strahlen werden erzeugt, indem geladene Teilchen auf hohe Energien beschleunigt und dann schnell abgebremst werden, in dem man sie auf ein Target auftreffen lässt. Das ist das gleiche Prinzip wie bei der Röntgenröhre.

2.3.1.5. Spontanspaltung

Der Atomkern spaltet sich dabei selbst, ohne Zufuhr von äußerer Energie. Diese Zerfallsart wird analog dem α -Zerfall gesehen. Dabei müssen große Massen tunneln. Die Halbwertszeit für dieses Ereignis wird auf etwa 10^{22} Jahre geschätzt. Die Halbwertszeit für den α -Zerfall beträgt nur $4,5 \cdot 10^9$ Jahre. Dieser Zahlenvergleich soll noch einmal vor Augen führen, warum den Physikern ein Zerfall in größere Bruchstücke unsinnig erschien, wenn sie die Emission von Spaltprodukten als quantenmechanisches -Tunnelphänomen betrachteten.

2.3.1.6. Zerfallsgesetz - Aktivität

Die Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit ist proportional zur Anzahl N der vorhandenen radioaktiven Atomkerne. Dies ist im mononuklearen Zeitgesetz für den radioaktiven Zerfall formuliert. Die Formel ist Ausdruck für die **Zerfallsrate**.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$$

N : Anzahl der Atome des Nuklids

dN/dt : Zahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Atome (Zerfallsrate)

λ : Zerfallskonstante. λ ist der Proportionalitätsfaktor der proportionalen Zuordnung, d.h. die Zerfallsrate ist abhängig von N . Die Einheit der Zerfallskonstante = 1 s^{-1} .

Sie ist identisch mit der Wahrscheinlichkeit W für den Zerfall innerhalb einer Zeiteinheit.

$$\lambda = \frac{dW}{dt}$$

Die Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne verringert sich innerhalb der Halbwertszeit jeweils auf den halben Wert. Die **Halbwertszeit** $T_{1/2}$ eines radioaktiven Elements ist eine charakteristische Größe, mit der eine Substanz identifiziert werden kann. Anstatt der Zerfallskonstanten λ benutzt man häufiger die Halbwertszeit. Das ist anschaulicher. $N = N_0/2$. N_0 ist N bei $t = 0$.

Abgeleitet aus dem Zerfallsgesetz ergibt sich

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Der radioaktive Zerfall eines Nuklids bedingt die **Aktivität** der betreffenden Substanz. Die Aktivität identisch mit der Zerfallsrate.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N = A$$

A : Aktivität. Die Einheit ist $[A] = 1 \text{ Becquerel (Bq)} = 1 \text{ s}^{-1}$

Man gibt die Zerfallsrate an als Zahl der Kernumwandlungen (Transmutationen) pro - Sekunde (tps). Die Einheit ist $[1 \text{ s}^{-1}]$. Die Aktivität ist auf das Radium bezogen. A von einem Gramm Radium = 1 Curie (Ci) = $3,7 \cdot 10^{10}$ tps.

1 Ci ist eine sehr hohe Aktivität. Meist hat man es mit μCi bis nCi zu tun. 1 nCi ist 37 tps.

Obige Gleichung enthält eine Beziehung zwischen der Zahl der vorhandenen radioaktiven Atome, ihrer Halbwertszeit und ihrer Aktivität; diese Beziehung erlaubt es z.B., aus der Aktivität und der Halbwertszeit die Zahl der radioaktiven Atome N bzw. ihre Masse m zu bestimmen:

$$N = \frac{A}{\lambda} = \frac{A}{\ln 2} \cdot T_{1/2}$$

bzw.

$$m = \frac{N \cdot M}{N_A} = \frac{A \cdot M}{N_A \cdot \ln 2} \cdot T_{1/2}$$

m : Masse

M : Nuklidmasse

N_A : Avogadrozahl

Rechenbeispiel:

Gegeben: Nuklid = ^{32}P ; $T_{1/2} = 14,3 \text{ d}$; $A = 1 \text{ Ci}$

Gesucht: N , m

Rechnung:
$$N = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \text{ tps}}{\ln 2} \cdot 14,3 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} = 6,6 \cdot 10^{16} \text{ Atome}$$

$$m = \frac{6,6 \cdot 10^{16} \cdot 32}{6,022 \cdot 10^{23}} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ g (3,5 } \mu\text{g)}$$

2.3.1.7. Impulsrate

Die Aktivität ist eine Stoffeigenschaft, die mit einem Detektor (Messplatz) gemessen werden kann. Die dazugehörige Messgröße ist die **Impulsrate I**, die über die Zählausbeute η mit der Aktivität verknüpft ist:

$$I = \eta \cdot A \quad (\eta \geq 1)$$

Zählausbeute η : Sie gibt an, welcher Bruchteil der Zerfallsprozesse gemessen wird. Sie ist abhängig von der Art der Strahlung, ihrer Energie, der Art des Detektors, der geometrischen Anordnung, der Selbstabsorption der Strahlung im Präparat und der Rückstreuung der Strahlung.

Außerdem geht die Häufigkeit des vom Detektor erfassten Zerfallsprozesses ein, die aus dem Zerfallschema entnommen werden kann, z.B. die Häufigkeit einer bestimmten γ -Linie oder die Häufigkeit des β -Zerfalls, bezogen auf die Summe der Zerfallsprozesse des betreffenden Nuklids. In den meisten Fällen bewegt sich die Zählausbeute innerhalb der Grenzen $0,01 < \eta < 1$. Zur Bestimmung von η verwendet man Standardpräparate, deren Aktivität genau bekannt ist. Die vom Detektor registrierte Impulsrate I' setzt sich zusammen aus der Impulsrate I des Präparats und dem Untergrund u .

$$I' = I + u = \eta \cdot A + u$$

Untergrund u : Die kosmische Strahlung bewirkt im Wesentlichen den so genannten Untergrund, den alle Detektoren für radioaktive Strahlung zeigen. Der andere Bestandteil des Untergrundes ist die Strahlung der radioaktiven Stoffe der Umgebung.

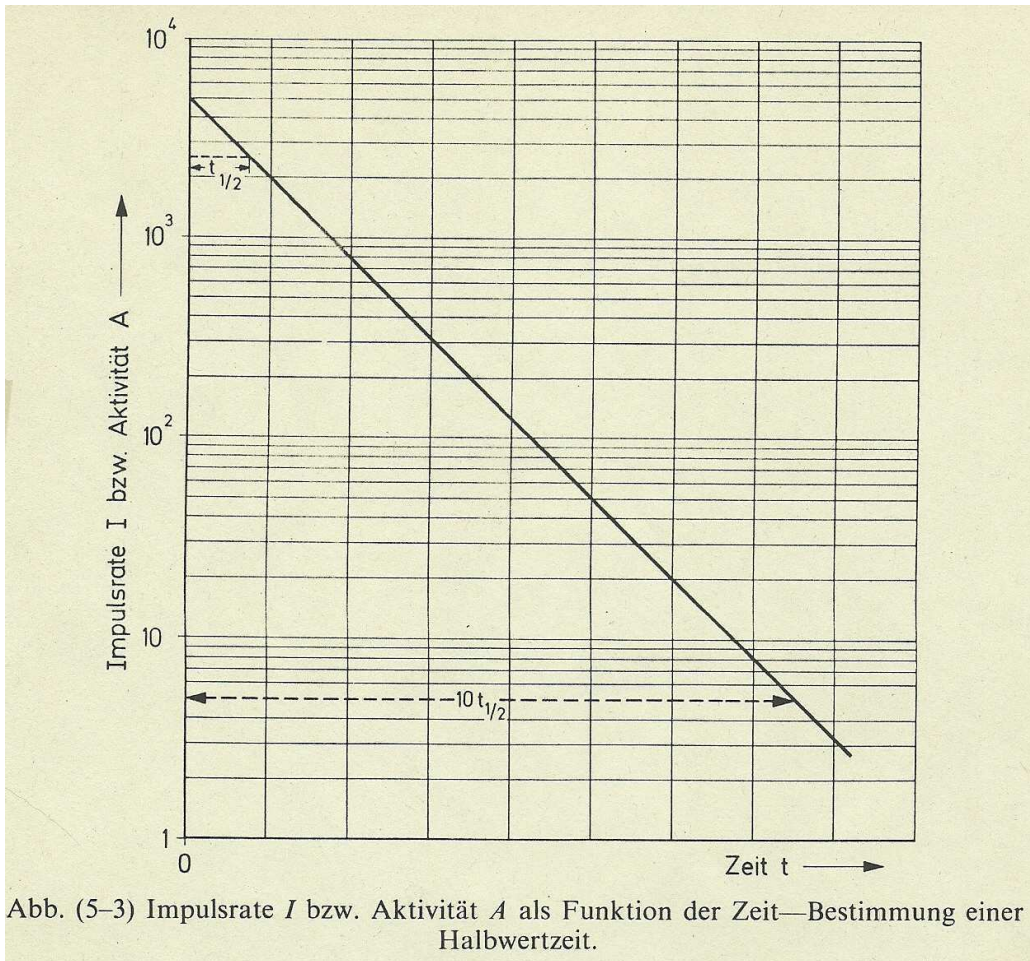


Abb. 14 Diagramm einer Zerfallskurve auf halblogarithmischem Papier

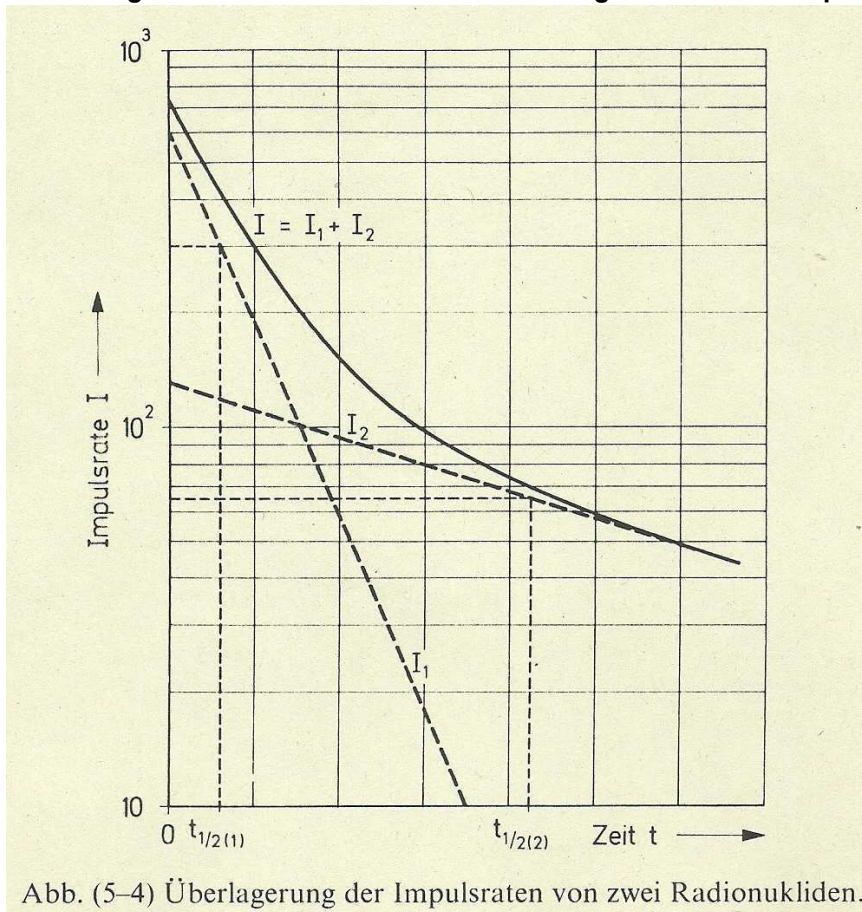


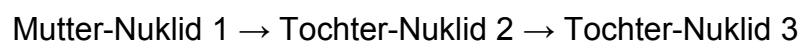
Abb. 15

Zeichnet man auf halblogarithmisches Papier die Impulsrate oder die Aktivität als Funktion der Zeit auf, so erhält man eine Gerade. An dieser Geraden kann man die Halbwertszeit des betreffenden Nuklids *abgreifen*. Es ist dann relativ einfach aus dem Diagramm auf halblogarithmischem Papier die Zeit abzulesen, welche die Aktivität braucht, um von einem bestimmten Wert auf die Hälfte dieses Wertes zu fallen. Dies ist die Halbwertszeit $T_{1/2}$. Diese graphische Methode zur **Bestimmung der Halbwertszeit** wird häufig angewendet. Die Kurve nennt man Zerfallskurve des Radionuklids. Siehe Abb. 14

Mischung mehrerer Nuklide: Bei mehreren Nukliden werden beide Geraden addiert. Siehe Abb. 15. Die Summe ergibt eine Kurve.

2.3.1.8. Radioaktives Gleichgewicht

Die genetische Beziehung wird wie folgt beschrieben:



Für die Nettobildungsrate des Tochternuklids gilt:

$$\frac{dN_2}{dt} = - \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_2 \cdot N_2 = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2$$

Der erste Term auf der rechten Seite ist die Bildungsrate des Nuklids 2, die gleich der Zerfallsrate des Nuklids 1 ist. Der zweite Term auf der rechten Seite ist die Zerfallsrate des Nuklids 2. Zur Zeit t_0 , also vor Beginn einer Messung nimmt man eine quantitative Trennung von Mutter und Tochter vor. Man beginnt mit $N_2^0 = 0$.

Das radioaktive Gleichgewicht ist erreicht, wenn das Verhältnis der Zahl der Atome N_2/N_1 , bzw. die Aktivitäten, konstant geworden sind. Man beachte, dass das radioaktive Gleichgewicht nicht, wie das chemische, reversibel ist.

Es gibt vier Möglichkeiten:

$T_{1/2} 1 \gg T_{1/2} 2$: säkulares Gleichgewicht. Der Zerfall des Mutternuklids kann vernachlässigt werden.

$T_{1/2} 1 > T_{1/2} 2$: transientes Gleichgewicht. Der Zerfall des Mutternuklids kann nicht mehr vernachlässigt werden.

$T_{1/2} 1 < T_{1/2} 2$: In diesem Fall stellt sich kein Gleichgewicht ein.

$T_{1/2} 1 \approx T_{1/2} 2$: Die Halbwertszeiten sind ähnlich. Das kommt bei der Kernspaltung häufig vor.

Oder: Das Tochternuklid ist stabil.

2.3.2. Binuklear

Allgemein: $A + x \rightarrow B + y + \Delta E$

Kurz: $A(x,y)B$

Beispiel: ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$

Kurz: ${}^{14}\text{N}(\alpha, p){}^{17}\text{O}$

Diese verkürzte Schreibweise bedeutet, dass das Symbol vor dem Komma (hier α) das Geschoss andeutet und das Symbol nach dem Komma (hier p) das Bruchstück.

2.3.2.1. Chemische Reaktion und Kernreaktion - Ein Vergleich

Wichtige **Unterschiede** zwischen chemischer Reaktion und Kernreaktion:

- Für chemische Reaktionen gilt das Gesetz der Erhaltung der Masse. Bei Kernreaktionen wird Materie in Energie umgewandelt oder umgekehrt. Es gilt das Gesetz von der Erhaltung der Summe von Masse und Energie:

$$mc^2 + E = \text{konstant}$$

- Die umgesetzten Energiebeträge entsprechen den Bindungsenergien. Bei chemischen Reaktionen sind das 1 bis einige eV ($1,6 \cdot 10^{-16}$ kJ) pro Bindung. Bei Kernreaktionen werden einige MeV ($1,6 \cdot 10^{-13}$ kJ) umgesetzt.

Ähnlich wie bei der chemischen Reaktion wird auch hier ein instabiler Zwischenzustand angenommen, der Zwischenkern (compound nucleus).

2.3.2.2. Energetik

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich zwischen chemischer Reaktion und Kernreaktion in energetischer Hinsicht:

Energetik	
Chemische Reaktion	Kernreaktion
Reaktionsenthalpie $\Delta H =$ Differenz der Bildungsenthalpien	Energie $\Delta E =$ Differenz der Massen (Massendefekt)
exotherm: $-\Delta H$	exoenergetisch: $+\Delta E$
endotherm: $+\Delta H$	endoenergetisch: $-\Delta E$

Bei endoenergetischen Reaktionen muss eine **Anregungsenergie** aufgebracht werden. Geht man davon aus, dass die Atome A im Target keine kinetische Energie besitzen, so muss die Anregungsenergie von dem Geschossteilchen x mitgebracht werden. Im allgemeinen ist aber nicht die gesamte kinetische Energie des Geschossteilchens x als Anregungsenergie für den Kern A verfügbar; wenn sich ein Zwischenkern bildet, wird ein Teil der kinetischen Energie als Impuls auf ihn übertragen und an die Reaktionsprodukte weitergegeben. Aus dem Impulserhaltungssatz folgt für den Impuls, den der Zwischenkern C erhält:

$$M_c \cdot v_c = M_x \cdot v_x$$

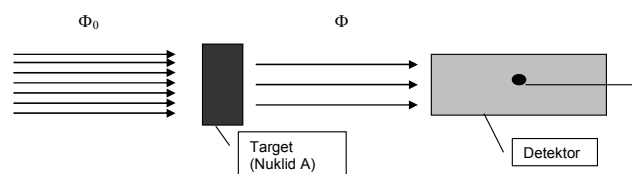
Für die Anregungsenergie E^* gilt, dass sie ebenso groß sein muss wie die für die Kernreaktion benötigte Energie $-\Delta E$:

$$E^* \geq -\Delta E$$

Die Mindestenergie der Teilchen x, die zur Auslösung der Kernreaktion erforderlich ist, wird als **Schwellenenergie** bezeichnet. Nur solche Teilchen, die mindestens diese Schwellenenergie besitzen, können die Kernreaktion auslösen.

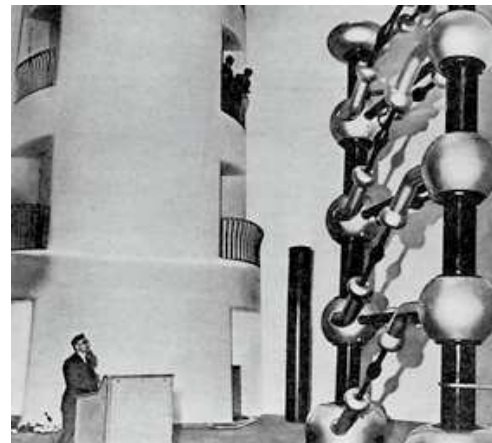
2.3.2.3. Bestimmungsverfahren und Energieeinheiten

Bestimmungsverfahren: Präparate werden mit Strahlung 'beschossen' (Φ ist der Teilchenfluss). Als Geschosse können **geladene Teilchen** oder **Neutronen** verwendet werden.

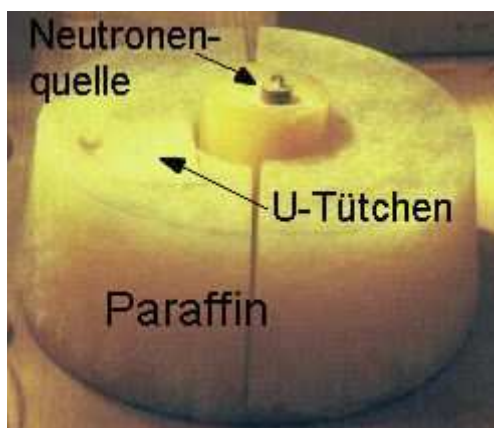


Damit Teilchen als 'Geschosse' wirken, müssen sie bestimmte Energiebeträge enthalten. In der Kernphysik ist die gebräuchliche **Energieeinheit** das "Elektron-Volt" [eV]. Definition: Es ist die Energie, die ein Elementarteilchen mit der Elementarladung von $1,6 \times 10^{-19}$ C gewinnt, wenn es eine Potentialdifferenz von 1 V durchläuft.

Als Maßstab gilt etwa: Um ein Elektron aus dem Atom zu entfernen, benötigt man einige eV. Um ein Nukleon aus dem Kern zu entfernen, benötigt man einige Millionen eV (MeV). Damit Teilchen für diese Zwecke beschleunigt werden können, müssen sie eine Potentialdifferenz von einigen Millionen Volt durchlaufen. Ein Proton der kinetischen Energie von 1 MeV hat eine Geschwindigkeit von etwa 10^4 km/sec. In den dreißiger Jahren erzeugte man solche Spannungen mit Van-de-Graaf-Generatoren und Kaskadengeneratoren (Bild rechts. KWI für Physik, Berlin-Dahlem 1939).



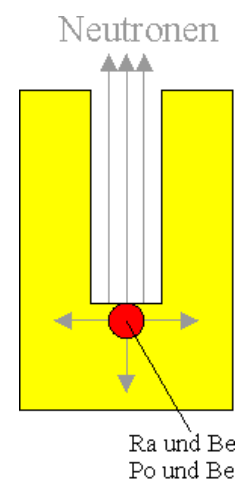
Neutronen können mit den Kernen bei Weitem am leichtesten reagieren, weil sie keine Ladung besitzen. Die Energie der Geschoss-Neutronen als kann durch entsprechende Versuchsanordnungen reguliert werden. Durch Moderatoren wie Paraffin oder Wasser wird die Geschwindigkeit herabgesetzt, bevor sie auf den Zielkern treffen. Die Abbildung zeigt die Hahn-Straßmannsche Versuchsanordnung.



Je nach Energiegehalt unterscheidet man die Neutronen als

thermische:	0 - 0,1 eV
langsame:	0,1 - 100 eV
mittelschnelle:	0,1 - 100 keV
schnelle:	0,1 - 10 MeV
ultraschnelle:	> 10 MeV

Als **Neutronenquellen** nutzte man vor der Entdeckung der Kernspaltung eine Mischung aus einem Alpha-Strahler, z.B. Radium, und Beryllium. Man kann auch andere Materialien kombinieren, die durch Alpha-Strahlung eine Neutronenabgabe anregen. Einige Gramm des Gemisches werden in ein dichtes Metallgehäuse eingeschlossen. Dadurch wird der Austritt der

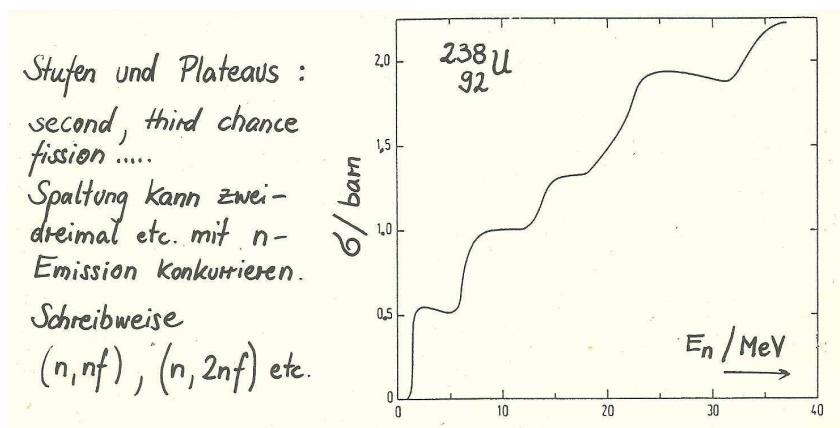


Alphateilchen verhindert. Abgegeben werden schnelle Neutronen und Gammastrahlung. Diese Art Neutronenquellen sind leicht transportabel und werden auch heute noch oft genutzt. Sobald Kernreaktoren zur Verfügung standen, besaß man sehr viel stärkere Neutronenquellen. Auch mit Teilchenbeschleunigern können Neutronenflüsse erzeugt werden.

Umso energiereicher die Geschosse sind, desto zahlreicher werden die miteinander konkurrierenden Kernreaktionen. Bei schweren Kernen sind verschiedene Reaktionen möglich, die miteinander **konkurrieren**:

- Einfang eines Neutrons durch den Kern und anschließende Spaltung
- Neutroneneinfang im Kern mit nachfolgender γ -Emission, also ohne Spaltung
- Neutroneneinfang an anderen Materialien
- Das Neutron entkommt der experimentellen Anordnung.

Abb. 17



Da die Neutronen keine Coulombsche Abstoßung erfahren, können sie im Bereich niedriger Energie mit hohem Wirkungsquerschnitt reagieren. Je höher die Geschwindigkeit der Neutronen ist, desto kürzere Zeit halten sie sich in der Nähe eines Kerns auf und desto geringer sollte der Wirkungsquerschnitt des Neutroneneinfangs sein, d.h., er sollte umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit der Neutronen abfallen ($1/v$ - Gesetz)

$$\sigma_n \approx \frac{1}{v_n}$$

Diese Bedingung ist bei niedriger Energie weitgehend erfüllt. (Siehe Lieser S. 277 Abb. 8-7). Bei höherer Energie treten Maxima auf, die **Resonanzstellen**. An diesen Resonanzstellen entspricht die kinetische Energie der Neutronen jeweils bestimmten bevorzugten Anregungsenergien. Die Kettenreaktion findet deshalb mit besonders guten Ausbeuten statt.

Resonanz: The condition for matching between excitation energy and a level energy of the compound nucleus is called resonance; (Friedlander. Nuclear und Radiochemistry) (Etwa: Die Übereinstimmung zwischen der Anregungsenergie und einem angeregten Zustand des Zwischenkerns nennt man Resonanz.) Mit anderen Worten: Ist die Wellenlänge der Nukleonen identisch mit der Wellenlänge eines ankommenden Teilchens, dann ist die Wechselwirkung besonders groß.

Wirkungsquerschnitt: Ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass die Reaktion eintritt. Sie ist definiert als Zahl der betrachteten Ereignisse pro Atom und Sekunde, dividiert durch die Flussdichte der einfallenden Teilchen pro cm^2 und Sekunde. Kennt man den Wirkungsquerschnitt und die Flussdichte, so kann der Ablauf von Kernreaktionen vorausberechnet werden. Der Wirkungsquerschnitt σ bezieht sich jeweils auf eine bestimmte Reaktion, z.B. auf eine (n,γ) -Reaktion mit einem bestimmten Nuklid A.

Schreibweise: $\sigma_{n,\gamma}^A$.

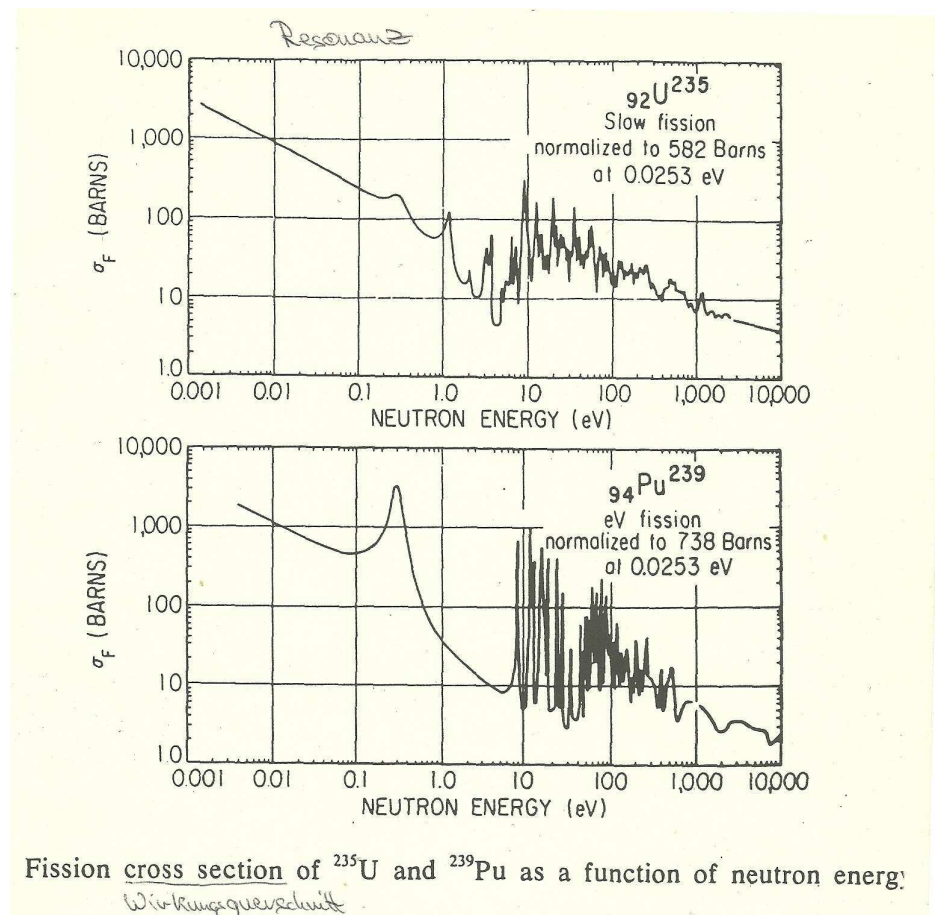


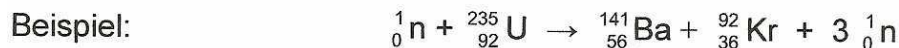
Abb. 16 Thermische Neutronen verursachen den höchsten Wirkungsquerschnitt

Geladene Teilchen, die mittels Teilchenbeschleunigern als Geschosse verwendet werden können sind: Protonen, Deutronen, α -Teilchen, Elektronen und Positronen zur Erzeugung von γ -Strahlung (Bremsstrahlung). Schwerionen: künstliche schwere Elemente.

2.3.2.4. Induzierte Kernspaltung

Energetisch: Siehe Diagramme Bindungsenergien (Abb. 5,6,7). Die Bindungsenergie pro Teilchen ist bei $A \approx 200$ deutlich kleiner als bei $A \approx 100$. Kinetische Energie wird aus der Massendifferenz der Bruchstücke gewonnen. Um eine Spaltung anzuregen, muss Energie von außen zugeführt werden. Ein großes Bruchstück muss die Potentialschwelle überwinden. Durch Aufnahme eines Neutrons entsteht ein Zwischenkern mit ausreichendem Energieüberschuss, um die Potentialschwelle zu überwinden. Die **Oberflächenspannung** ist im hochgeladenen Urankern durch die gegenseitige Abstoßung der Protonen stark vermindert. Wenn der Kern in die Länge deformiert wird, bildet sich eine Einschnürung und schließlich erfolgt eine Trennung in zwei leichtere Teile, die wegen ihrer gegenseitigen Abstoßung mit großer Heftigkeit auseinander fliegen. Der künstliche Spaltprozess wird also in einem Bild der klassischen Physik beschrieben, er ist kein Tunnelprozess. Wegen der größeren Protonenzahl im Uran und damit der größeren elektrostatischen Abstoßung sind die Kernbausteine im Uran schwächer gebunden als in den Spaltbruchstücken. Damit ist die Kernspaltung auch energetisch möglich.

Kernenergie:



Rechnung: Gesamtmasse der Reaktionspartner: 236,0526 u
Gesamtmasse der Produkte: 235,8373 u
in Energie umgewandelte Masse: 0,2153 u

$$1,0000 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$0,2153 \text{ u} = 3,57 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

$$E = m \cdot c^2$$

$$\begin{aligned} \text{Freigesetzte Energie} &= (3,57 \cdot 10^{-28} \text{ kg}) \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 3,21 \cdot 10^{-11} \text{ J} \end{aligned}$$

$$\text{Umrechnung in eV: } \frac{3,21 \cdot 10^{-11} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}} = 2,01 \cdot 10^8 \text{ eV} = \underline{\underline{201 \text{ MeV}}}$$

Zum Vergleich:

Ionisationsenergie des Wasserstoffatoms = $2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$

$$\text{Umrechnung in eV: } \frac{2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}} = \underline{\underline{13,6 \text{ eV}}}$$

Kontrollierte Kettenreaktion: *Flügge* schlug vor, der Uranlösung Cadmium beizufügen. Cadmium hat für thermische Neutronen einen sehr großen Einfangquerschnitt. Je nach der Menge des beigemischten Cadmiums können die überschüssigen Neutronen weggefangen werden. Schließlich stellt sich bei einer bestimmten Temperatur ein Gleichgewicht ein, bei dem ebenso viele Neutronen vom Cd eingefangen, wie bei der Spaltung produziert werden. Die **Wärme**, die von dem System nach außen abgeführt wird und **die dann genutzt werden kann**, wird durch Kernspaltungen wieder ersetzt, sodass die Temperatur der Anlage konstant bleibt.

Bildungs- und Zerfallseigenschaften der Kernbruchstücke nach der Spaltung. Kurz nachdem sich die beiden Fragmente getrennt haben, emittieren die hochangeregten Bruchstücke Neutronen und verringern so ihren Neutronenüberschuss. Anschließend geben sie ihre überschüssige Anregungsenergie in Form von γ -Strahlung ab. Diese Spaltprodukte nach der Neutronenabdampfung sind jedoch noch nicht stabil. Durch den β -Zerfall verringern sie weiter ihren Neutronenüberschuss, bis schließlich langlebige oder stabile Isotope erreicht sind. Der β -Zerfall kann in angeregte Energiezustände des Tochterkerns führen. Durch Emission von γ -Strahlung kann der Kern dann in seinen energetisch tiefsten Zustand übergehen. Er kann jedoch auch die überschüssige Energie direkt auf ein Hüllenelektron übertragen, wodurch das betreffende Atom ionisiert wird. Dieser Prozess wird als innere **Konversion** bezeichnet.

Ab 1950 benutzte man physikalische Methoden, mit denen man direkt Masse und Kernladung der Spaltprodukte bestimmen kann. Als Neutronenquelle mit sehr hohen Neutronenflüssen werden heute Kernreaktoren benutzt. Mit dem Spektrometer können Massenhäufigkeitsverteilungen und Energieverteilungen der Spaltprodukte direkt bestimmt werden. Mit zusätzlichen Detektoren kann auch die Kernladung der Spaltprodukte gemessen werden.

Asymmetrie der Kernspaltung. Bei der Spaltung werden offensichtlich Fragmente mit einer geraden Ordnungszahl gegenüber Fragmenten mit ungerader Ordnungszahl bevorzugt gebildet.

Massenverteilungen bei der Spaltung

- (a) $^{235}\text{U} + 14\text{MeV n}$
- (b) $^{226}\text{Ra} + 11\text{MeV p}$
- (c) $^{209}\text{Bi} + 22\text{MeV d}$
- (d) $^{235}\text{U} + 27\text{MeV } \alpha$
- (e) $^{257}\text{Fm} + n_{th}$

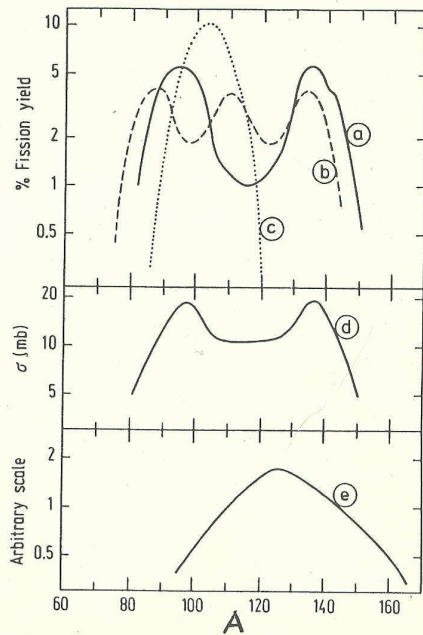


Abb. 18

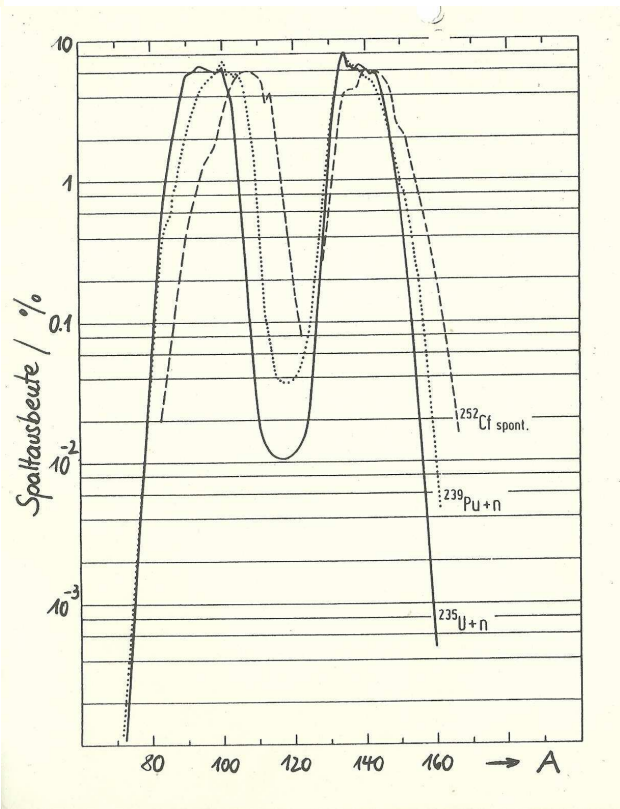


Abb. 19

2.3.2.5. Übersicht über die Kernumwandlungen

Mononuklear

Allgemeine Reaktionsgleichung: $A \longrightarrow B + x + \Delta E$

α -Zerfall: ${}_{88}^{226}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha} {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$

β^- -Zerfall: $n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}$
 ${}_{90}^{231}\text{Th} \xrightarrow{\beta^-} {}_{91}^{231}\text{Pa} + e^- + \bar{\nu}$

β^+ -Zerfall: $p \longrightarrow n + e^+ + \nu$
 ${}_{34}^{73}\text{Se} \xrightarrow{\beta^+} {}_{33}^{73}\text{As} + e^+ + \nu$

Binuklear

Allgemein: $A + x \longrightarrow B + y + \Delta E$

Kurz: $A(x,y)B$

Beispiel: Beschuss von Stickstoff mit α -Strahlen:



Kurz: ${}^{14}\text{N}(\alpha, p){}^{17}\text{O}$

Beispiel: Kernspaltung: ${}_0^1n + {}_{92}^{235}\text{U} \longrightarrow {}_{56}^{141}\text{Ba} + {}_{36}^{92}\text{Kr} + 3{}_0^1n$

Kurz (f = fission): ${}^{235}\text{U}(n,f){}^{141}\text{Ba}$

C. Literatur

Atkins, Kenneth. Physik. Die Grundlagen des physikalischen Weltbildes, Berlin 1986

Curie, Marie, Untersuchungen über die radioaktiven Substanzen, Braunschweig 1904

Hahn, Otto, Vom Radiothor zur Kernspaltung, Braunschweig 1962

Keller, Cornelius, Radiochemie, Frankfurt 1975

Lieser, Karl Heinrich, Einführung in die Kernchemie, Weinheim 1969

Wohlfarth, Horst, 40 Jahre Kernspaltung. Eine Einführung in die Originalliteratur, Darmstadt 1979