

# Kernzerfälle

Schon seit über 100 Jahren ist schon bekannt, dass manche Stoffe eine starke Strahlung abgeben: am 1. März 1896 bemerkte der französische Physiker **Antoine Henri Becquerel**, dass Uransalze in der Lage sind, Fotoplatten zu schwärzen, auch wenn diese so eingepackt sind, dass kein Licht auf sie gelangen kann. Er vermutete daraufhin, dass Uran eine Art von Strahlung abgibt, die in der Lage ist, die Verpackung zu durchdringen, und nannte diese *Uranstrahlen*.

Becquerels Entdeckung wurde (im Gegensatz zu den zur selben Zeit entdeckten Röntgenstrahlen) zunächst kaum beachtet. Doch die französische Physikerin polnischer Herkunft **Marie Sklodowska Curie** war zu dieser Zeit auf der Suche nach einem Thema für ihre Doktorarbeit und beschloss, die von Becquerel entdeckten Strahlen (zusammen mit ihrem Mann **Pierre Curie**) näher zu untersuchen. Dabei entdeckten sie 1898 unter anderem, dass auch das Element Thorium solche Strahlen abgibt (dies wurde unabhängig davon auch vom deutschen Physiker Gerhard Schmidt festgestellt), und entdeckten die beiden vorher unbekannt, stark strahlenden Elemente Polonium und Radium. Marie Curie prägte zu dieser Zeit für diese spontan, ohne äußere Anregung, strahlenden Elemente den Begriff radioaktiv (von lateinisch *radius* = Strahl). Für ihre Forschungen erhielten die Curies und Becquerel 1903 den Physik-Nobelpreis.

Im Laufe der nächsten Jahre (bis etwa 1908) wurde dann durch verschiedene Wissenschaftler (**Rutherford** (Nobelpreis 1908), **Becquerel**, **Stefan Meyer**, **Egon Schweidler**, **Friedrich Giesel**, **Paul Ulrich Villard**) gezeigt, dass es nicht nur eine, sondern sogar drei verschiedene Typen dieser radioaktiven Strahlung gibt. Sie unterscheiden sich unter anderem in ihrem Vermögen, Materie zu durchdringen, und wie sie von einem Magnetfeld abgelenkt werden:

- $\alpha$ -Strahlung: besteht aus Teilchen der Masse  $4 \cdot m_H$ , doppelt positiv geladen – He4-Atomkerne!
- $\beta$ -Strahlung: besteht aus Elektronen
- $\gamma$ -Strahlung: nicht elektrisch geladen; elektromagnetische Strahlung

Die Quelle dieser Strahlung war zunächst völlig unklar – doch schon 1902 vermutete **Rutherford**, dass chemische Elemente beim Aussenden radioaktiver Strahlung in andere Elemente von niedrigerer Ordnungszahl übergehen. Im Jahre 1913 wurden dann von dem US-amerikanischen Chemiker polnischer Herkunft **Kasimir Fajans** und vom englischen Chemiker **Frederick Soddy** (ein Schüler Rutherfords) die *radioaktiven Verschiebungssätze* aufgestellt. Sie besagen, dass ein Stoff, von dem  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlung ausgeht, sich dabei jeweils in ein anderes Element umwandelt:

- bei Aussendung von  $\alpha$ -Strahlung nimmt Z um 2 und A um 4 ab, N nimmt also um 2 ab
- bei Aussendung von  $\beta$ -Strahlung nimmt Z um 1 ab, A bleibt gleich, N nimmt also um 1 zu

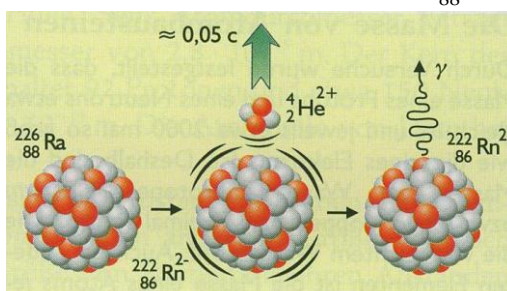
Die Folgerung daraus war klar: Manche Nuklide sind nicht stabil, sondern können He4-Atomkerne oder Elektronen abgeben und sich dabei in ein anderes Nuklid umwandeln. Man spricht dabei von einem  $\alpha$ - bzw.  $\beta$ -Zerfall. Wie bei chemischen Reaktionen schreibt dafür man eine „Reaktions-“Gleichung:

- $\alpha$ -Zerfall:  ${}^A_Z X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y^{2-} + {}^4_2 \text{He}^{2+}$
- $\beta$ -Zerfall:  ${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z+1} Y^+ + e^-$

(die elektrischen Ladungen lässt man hier aber meist weg; für  $e^-$  schreibt man manchmal auch  ${}^0_{-1}e$ )

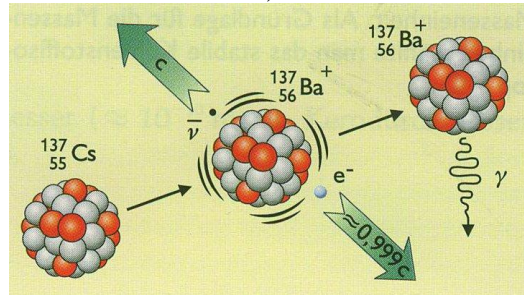
Beispiele:

- $\alpha$ -Zerfall eines Radium-Nuklids zu einem Radon-Nuklid:  ${}^{226}_{88} \text{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86} \text{Rn} + {}^4_2 \text{He}$



- $\beta^-$ -Zerfall eines Cäsium-Nuklids zu einem Barium-Nuklid:  ${}^{137}_{55}\text{Cs} \longrightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + {}^0_{-1}\text{e}$

Beim  $\beta^-$ -Zerfall bleibt die Massenzahl gleich, die Kernladungszahl erhöht sich aber um eins – das heißt, ein Neutron eines Atomkerns wandelt sich in ein Proton um und gibt dabei ein Elektron ab (was letztlich heißt: ein down-Quark wandelt sich in ein up-Quark um und gibt dabei ein Elektron ab). Genauere Untersuchungen zeigten, dass dabei noch ein elektrisch neutrales, sehr leichtes Teilchen entsteht: ein sogenanntes Elektron-(Anti-)Neutrino  $\bar{\nu}$ . Dieses reagiert kaum mit Materie und ist deshalb nur sehr schwer beobachtbar (und ungefährlich!). Vermutet wurde dessen Existenz schon 1930 vom österreichischen Physiker **Wolfgang Pauli**; der Nachweis gelang erst im Jahre 1956 den US-amerikanischen Physikern **Clyde L. Cowan** und **Frederick Reines** (den Nobelpreis, den Reines 1995 dafür erhielt, erlebte Cowan nicht mehr mit – er starb bereits 1974).

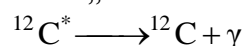


Neben dem  $\alpha$ - und  $\beta^-$ -Zerfall gibt es noch andere Zerfallsarten von Atomkernen, die aber alle erst später entdeckt wurden:

- in Nukliden mit besonders vielen Protonen kann es vorkommen, dass sich ein Proton in ein Neutron umwandelt (also eigentlich ein up-Quark in ein down-Quark); dabei entsteht ein sogenanntes *Positron*  $e^+$  (das *Antiteilchen* zum Elektron) und ein *Elektron-Neutrino*  $\nu$ . Da dieser Zerfall sehr ähnlich zum  $\beta^-$ -Zerfall ist (im Prinzip genau umgekehrt), spricht man hier von einem  $\beta^+$ -Zerfall und nennt den normalen  $\beta^-$ -Zerfall dementsprechend oft auch einen  $\beta^-$ -Zerfall.
- Einige Nuklide geben spontan einzelne Protonen ab (oder auch ganze C12-Atomkerne).
- Manche sehr schwere Nuklide spalten sich auch spontan in kleinere Nuklide auf (beispielsweise Uran – dies ist die Grundlage von Kernkraftwerken, siehe später!).

Auf welche dieser Arten ein Nuklid zerfallen kann, wird in der Nuklidkarte farblich dargestellt: schwarz sind die stabilen Nuklide, die nicht zerfallen (bzw. die so langsam zerfallen, dass man es nicht feststellen kann).  $\alpha$ -Zerfälle sind gelb dargestellt,  $\beta^-$ - und  $\beta^+$ -Zerfälle blau bzw. rosa, Protonenabgabe orange, spontane Spaltung grün. Bei manchen Nukliden gibt es auch mehrere Möglichkeiten und dementsprechend mehrere Farben.

Gamma-Strahlung hat dagegen nicht wirklich etwas mit einem Zerfall von Atomkernen zu tun, sondern entsteht im Prinzip genauso wie Licht (oder Ultraviolett-Strahlung, ...), das von Atomen abgegeben wird: Atome geben elektromagnetische Strahlung ab, wenn Elektronen von einer energiereicheren Schale (genauer: „Zustand“) in eine energieärmere übergehen. Genauso gibt es für Atomkerne energiereichere („angeregte“, z. B kann ein Atomkern schwingen) und energieärmere Zustände; geht ein Atomkern von einem angeregten in einem niedrigeren Energiezustand über, so wird ebenfalls elektromagnetische Strahlung frei. Diese ist aber weit energiereicher als Licht oder selbst UV-Strahlung (etwa um einen Faktor von 100 000 und mehr!). Angeregte Zustände eines Kerns werden meist mit einem Stern rechts oben bezeichnet; so kann man bei einem Gamma-„Zerfall“ eines Kohlenstoff-12-Kerns etwa schreiben:



#### Aktivität:

Je nach Nuklid und je nach Menge N (Anzahl Atomkerne) eines radioaktiven Stoffes finden pro Zeiteinheit unterschiedlich viele Zerfälle statt. Man definiert: Die Aktivität A eines radioaktiven Präparats ist der Quotient aus der Anzahl  $\Delta N$  der Zerfälle und der Messzeit  $\Delta t$ :

$$A = (-) \frac{\Delta N}{\Delta t}; [A] = 1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Bq (Becquerel)}.$$

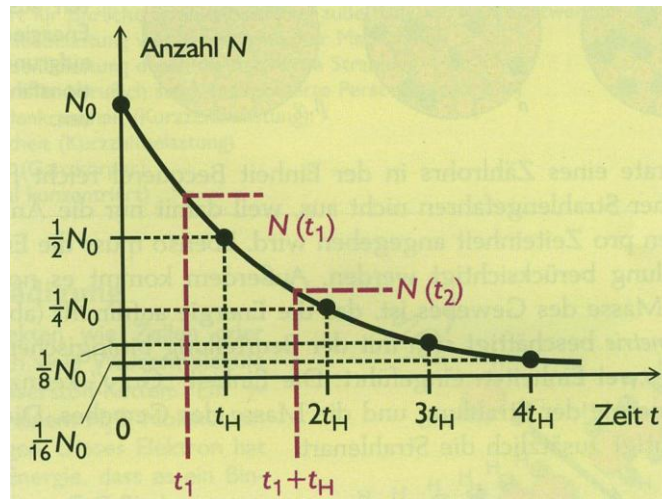
Man stellt fest:  $A$  ist immer proportional zur noch vorhandenen Anzahl  $N$  der Kerne:  $A = \lambda \cdot N$ , wobei  $\lambda$  die Zerfallskonstante genannt wird.

Anmerkungen:

- Hier werden leider dieselben Buchstaben  $A$  bzw.  $N$  wie bei der Massenzahl bzw. der Neutronenanzahl verwendet – nicht verwechseln!
- Eigentlich ist  $A$  die (zeitliche) Ableitung von  $N$ :  $A(t) = -N'(t)$

zeitlicher Verlauf des Zerfalls:

Bei radioaktiven Zerfällen zerfällt pro Zeiteinheit nicht immer dieselbe Anzahl von Atomkernen, sondern derselbe Anteil (vgl. *absolute/relative Häufigkeit in der Stochastik!*). Die Zeit, in der jeweils die Hälfte der vorhandenen Atomkerne zerfällt, nennt man die Halbwertszeit  $t_H$  des Nuklids (dieser Begriff wurde im Jahre 1900 von **Rutherford** eingeführt, als er diese Gesetzmäßigkeit als erster erkannte).



Halbwertszeiten verschiedener Isotope können völlig unterschiedlich sein; so hat beispielsweise U238 eine Halbwertszeit von 4,5 Mrd. a, C14 von 5730 a, Rn220 von 55,6 s, von B12 20,20 ms usw. usf. Die Halbwertszeiten der Nuklide findet man in der Nuklidkarte.

Beachte: Für einen bestimmten, beliebig herausgegriffenen Atomkern ist es unmöglich vorherzusagen, wann er zerfallen wird; man kann nur die Wahrscheinlichkeit dafür angeben, dass er nach einer bestimmten Zeit zerfallen sein wird! Diese Wahrscheinlichkeit ändert sich aber auch nicht mit der Zeit – Kerne „altern“ nicht, sondern auch für einen Kern, der schon viele Halbwertszeiten „überlebt“ hat, ist die Wahrscheinlichkeit, innerhalb der nächsten Halbwertszeit zu zerfallen, weiterhin 50%.

Da die Zahl der Zerfälle pro Zeit, also die Aktivität  $A$ , proportional zur Anzahl  $N$  der noch vorhandenen Atome ist, folgt, dass auch die Aktivität mit jeder Halbwertszeit jeweils auf die Hälfte abnimmt. Es ergeben sich also folgende Zerfallsgesetze:

$$N(t) = N_0 \cdot 0,5^{t/t_H} \quad \text{bzw.} \quad A(t) = A_0 \cdot 0,5^{t/t_H},$$

wobei  $t_H$  die Halbwertszeit ist und  $N_0$  bzw.  $A_0$  die Anzahl der Atome bzw. die Aktivität zur Zeit  $t = 0$ .

(Anmerkung: Zwischen der oben erwähnten Zerfallskonstante  $\lambda$  und der Halbwertszeit  $t_H$  besteht der Zusammenhang  $\lambda = \ln 2 / t_H \approx 0,69/t_H$ .)

Anwendung: Altersbestimmung

Bei bekannter Halbwertszeit und bekannter Anfangsmenge (bzw. –konzentration) eines Nuklids in einer Probe kann mit Hilfe des Zerfallsgesetzes leicht das Alter der Probe fest gestellt werden. Dies wendet man z. B. in der Archäologie an, um das Alter von organischen Materialien (z. B. Holzbalken, Kämmen oder Schmuck aus Knochen, die Leiche von „Ötzi“, Farbstoffe in Höhlenmalereien, ...) zu bestimmen: Man misst die Konzentration an C14 in der Probe und vergleicht diese mit der bekannten Konzentration von C14 in lebenden Organismen (*Radiokarbon-Datierung*). Kompliziertere Methoden wie beispielsweise die *Isochronen-Datierung* kommen sogar ohne Kenntnis der ursprünglichen Menge des Nuklids aus.