

## Die Kernstrahlungsarten

Der Begriff „Strahlung“ bezog sich hierbei sowohl auf Teilchen wie Elektronen, Neutronen und  $\alpha$ -Teilchen als auch auf elektromagnetische Strahlung.

Die drei radioaktiven Strahlungen wurden  $\alpha$ -Strahlung,  $\beta$ -Strahlung und  $\gamma$ -Strahlung genannt, bevor man wusste, dass es sich bei  $\alpha$ -Teilchen um  ${}^4_2\text{He}$ -Kerne, bei  $\beta$ -Teilchen um Elektronen ( ${}^0_{-1}e$ ) oder Positronen ( ${}^0_{+1}e$ ) und bei  $\gamma$ -Strahlung um harte, also energiereiche Photonen handelt.

Beim *Spontanzerfall* treten in der Regel die o.g. drei Kernstrahlungsarten auf, der

1.  $\alpha$ -Zerfall,
2.  $\beta$ -Zerfall
3. die  $\gamma$ -Strahlung.

## Der Beta-Zerfall

Der  $\beta$ -Zerfall tritt bei Kernen auf, die zu viele oder zu wenige Neutronen besitzen, um stabil zu sein.

Beim  $\beta$ -Zerfall bleibt die Massenzahl  $A$  des Kerns unverändert, dagegen ändert sich die Ladungszahl  $Z$  um  $+1$  beim  $\beta^-$ -Zerfall oder um  $-1$  beim  $\beta^+$ -Zerfall.

Der einfachste  $\beta$ -Zerfall ist der eines freien instabilen Neutrons in ein Proton und ein Elektron mit einer Halbwertszeit von etwa  $889s$ . Die freiwerdende Energie lässt sich aus der Differenz der Ruhemassen des Neutrons und des Protons und Elektrons berechnen und beträgt  $0,782\text{MeV}$ . **Es gelten in jedem Fall die Sätze von der Erhaltung der Energie, der Ladung und der Masse.**

Es zeigte sich, dass bei entsprechenden Rechnungen zur Energie und zur Masse ein Massendefekt auftrat.

Um die offensichtliche Verletzung der Energieerhaltung im  $\beta$ -Zerfall zu vermeiden, postulierte Wolfgang Pauli im Jahr **1930** die *Existenz eines neuen Teilchens*, des sog. **Neutrinos**.

Dieses Teilchen sollte beim  $\beta$ -Zerfall zusammen mit dem Elektron erzeugt werden und die Überschussenergie tragen. Die Ruhemasse des Neutrinos wurde als null angenommen, da die maximale kinetische Energie der Elektronen gleich der Energiedifferenz ist, die bei dem Zerfall maximal freigesetzt wird.

Im Jahr 1948 zeigten Impulsmessungen des emittierten Elektrons und des zurückgestoßenen Kerns, dass das Neutrino auch für die Impulserhaltung benötigt wird.

Im Jahr 1956 gelang schließlich der experimentelle Nachweis des Neutrinos.

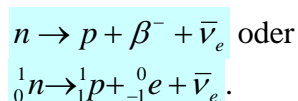
Wie wir heute mit ziemlicher Sicherheit wissen, existieren drei verschiedenen Arten von Neutrinos:

1. das mit dem Elektron assoziierte Elektron-Neutrino  $\nu_e$ ,
2. das mit dem Myon assoziierte Myon-Neutrino  $\nu_\mu$  sowie
3. das mit den Tauon-Lepton assoziierte Tauon-Neutrino  $\nu_\tau$ .

Darüber hinaus besitzt jedes Neutrino ein eigenes Antiteilchen.

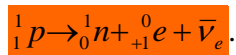
Das im  $\beta^-$ -Zerfall des Neutrons emittierte Neutrino ist das Elektron-Antineutrino.

Die vollständige Reaktionsgleichung für diesen Zerfall lautet daher:



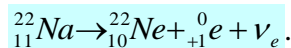
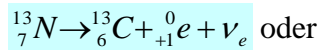
Im  $\beta^+$ -Zerfall geht ein im Kern gebundenes Proton unter Emission eines Positrons und eines Elektron-Neutrinos in ein Neutron über.

Theoretisch bedeutet das:



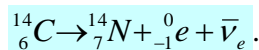
Für ein freies Proton ist dieser Zerfall jedoch aus Gründen der Energieerhaltung **nicht** möglich, denn die Summe der Ruhemassen von Neutron und Positron ist größer als die Ruhemasse des Protons.

Innerhalb eines Kerns ist ein solcher Prozess jedoch möglich, die benötigte Energie stammt hierbei aus der Bindungsenergie des Protons. Ein typischer Fall solchen  $\beta^+$ -Zerfalls ist:



Die beim  $\beta$ -Zerfall auftretenden Elektronen und Positronen werden erst beim Zerfallsprozess erzeugt, sie sind also nicht als Teilchen im Kern vorhanden.

Ein **äußerst wichtiges Beispiel** für einen  $\beta^-$ -Zerfall ist der von  ${}^{14}C$ . Dieser Zerfall ist die Grundlage für die C-14- oder Radiokohlenstoffmethode, die man zur archäometrischen Datierung von organischen Stoffen heranzieht:



Die Halbwertszeit für diesen Zerfall beträgt **5730 Jahre**.  ${}^{14}C$  wird in höheren Atmosphärenschichten laufend durch den Beschuss von  ${}^{12}C$  mit kosmischer Strahlung erzeugt. Die chemischen Eigenschaften der beiden Isotope unterscheiden sich nicht, beide bilden zusammen mit Sauerstoff Kohlendioxidmoleküle. Da lebende Organismen kontinuierlich mit der Umwelt  $CO_2$  austauschen, ist das Verhältnis von  ${}^{14}C$  und  ${}^{12}C$  in einem lebenden Organismus gleich dem Gleichgewichtsverhältnis in der Atmosphäre, das etwa  $1,3 \cdot 10^{-12}$  beträgt. Stirbt der Organismus ab, so wird kein weiteres  ${}^{14}C$  aufgenommen.

Auf Grund des  $\beta$ -Zerfalls von  ${}^{14}C$  sinkt das Verhältnis kontinuierlich.

### Anwendungsbeispiel

Ein Knochen mit einem Kohlendioxidgehalt von 200 Gramm besitze eine  $\beta$ -Zerfallsrate von 400 Zerfällen pro Minute. Wie alt ist der Knochen?

Wir stellen zunächst fest, dass wir für einen Knochen in einem lebenden Organismus

$\frac{15 \text{ Zerfälle}}{\text{min} \cdot g} \cdot 200 g = 3000 \frac{\text{Zerfälle}}{\text{min}}$  erwarten würden. Nach  $n$  Halbwertszeiten ist die Zerfallsrate auf einen um

einen Faktor  $\left(\frac{1}{2}\right)^n$  geringeren Wert abgefallen, es gilt also

$$\left(\frac{1}{2}\right)^n = \frac{400}{3000}$$

bzw.

$$2^n = \frac{3000}{400} = 7,5.$$

Wir lösen durch Logarithmieren nach  $n$  auf und erhalten

$$n \cdot \ln 2 = \ln 7,5$$

$$n = \frac{7,5}{2} = 2,91.$$

Das Alter der Knochen beträgt demnach

$$t = nt_H = 2,91 \cdot 5730 \text{ Jahre} = 16700 \text{ Jahre}.$$

### Der Gamma – Zerfall

Beim  $\gamma$ -Zerfall geht ein Kern aus einem angeregten Zustand unter Emission eines Photons in einen Zustand geringerer Energie über.

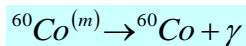
Es handelt sich bei diesem Prozess also um das nukleare Gegenstück zur spontanen Emission eines Photons durch ein Atom oder ein Molekül.

Beim  $\gamma$ -Zerfall behält der Kern seine Ladungs- und Massenzahl bei, er zerfällt also nicht in ein anderes Nuklid. Da die Differenzen zwischen den Energieniveaus im Kern in der Größenordnung von  $1 \text{ MeV}$  liegen, besitzen die emittierten Photonen typischerweise Wellenlängen von  $1 \text{ pm}$ :

$$\lambda = \frac{hc}{E} \approx \frac{1240 \text{ eVnm}}{1 \text{ MeV}} = 0,00124 \text{ nm} = 1,24 \text{ pm}.$$

Der  $\gamma$ -Zerfall ist ein im allgemeinen sehr schnell ablaufender Prozess und lässt sich nur deshalb beobachten, weil er normalerweise einem  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall folgt.

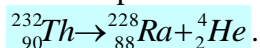
Einige  $\gamma$ -Strahler besitzen eine sehr lange mittlere Lebensdauer in der Größenordnung von Stunden. Solche Kernzustände heißen **metastabile Zustände**.



### Der Alpha – Zerfall

Theoretisch sind alle sehr schweren Kerne ( $Z > 83$ ) instabil gegenüber dem  $\alpha$ -Zerfall, da die Masse dieser Kerne geringer ist als die Summe der Zerfallsprodukte, also des Tochterkerns und eines  $\alpha$ -Teilchens.

Wir betrachten als Beispiel den  $\alpha$ -Zerfall des  ${}^{232}\text{Th}$  in  ${}^{228}\text{Ra}$ :



Im Gegensatz zu  $\beta$ -Zerfall ist die kinetische Energie der  $\alpha$ -Teilchen sehr gut definiert. Man benötigt also kein drittes Teilchen wie das Neutrino, um die Energieverteilung zu untersuchen und zu verstehen.

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der radioaktive Kernzerfall zu 4 Zerfallsreihen zusammenfassen lässt, wobei heute nur noch 3 Zerfallsreihen in der Natur vorkommen.

Die drei heute noch vorkommenden Zerfallsreihen sind:

1. Uran-Radium-Zerfallsreihe
2. Aktinium-Zerfallsreihe
3. Thorium-Zerfallsreihe
4. Neptunium-Zerfallsreihe (kommt in der Natur nicht mehr vor)

Diese werden nachfolgend dargestellt.

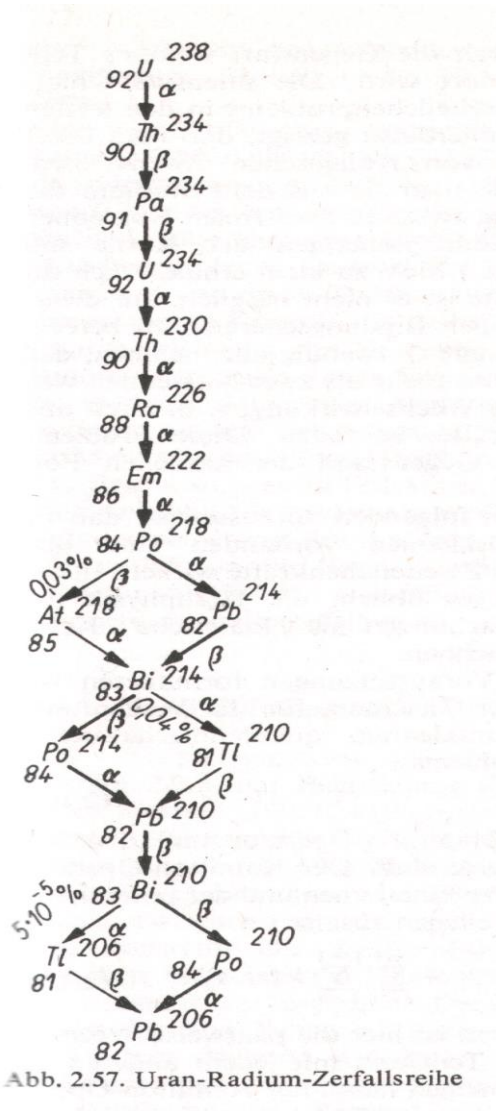


Abb. 2.57. Uran-Radium-Zerfallsreihe

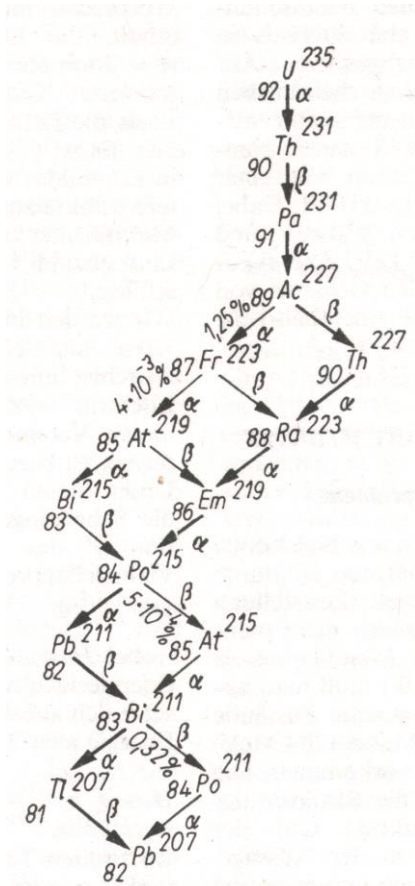


Abb. 2.58. Aktinium-Zerfallsreihe

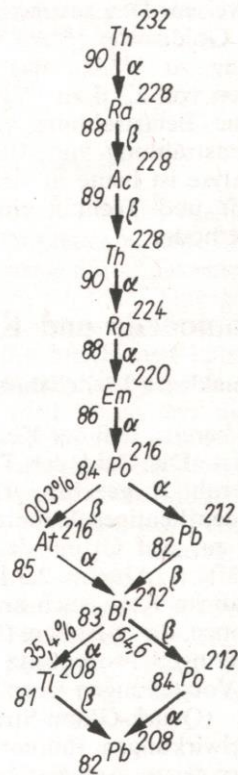


Abb. 2.59. Thorium-Zerfallsreihe

Für jede dieser Zerfallsreihen ist charakteristisch, dass sie auf das Isotop Blei enden.