

Radioaktive Strahlung

- Es gibt drei Arten radioaktiver Strahlung, die alle zur ionisierenden Strahlung gehören. Man unterscheidet sie durch Ionisationsvermögen und ihre Reichweite in Materie, sowie ihre Ablenkung in elektrischen und magnetischen Feldern.
- **Strahlungsarten:**

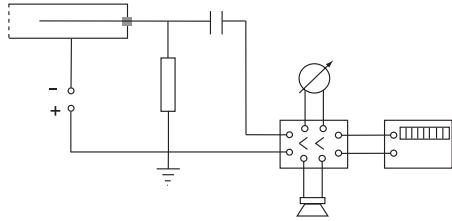
Strahlungsarten	α -Strahlung	β -Strahlung	γ -Strahlung
Strahlung besteht aus	positiv geladenen Heliumkernen	Elektronen (β^-) bzw. Positronen (β^+)	energiereichen Photonen
Energie	3 MeV bis 11 MeV	bis etwa 3 MeV	0,001 MeV bis 10 MeV
Reichweite in Luft	einige Zentimeter	einige Meter	sehr groß
Abschirmung	durch ein Blatt Papier	durch ein dünnes Aluminiumblech	durch dicke Bleiplatten; vollständige Abschirmung nicht möglich

- Da es sich bei α -Strahlung und β -Strahlung um geladene Teilchen handelt, werden sie von elektrischen und magnetischen Feldern abgelenkt.
- **Wechselwirkung mit Materie:**
 - α -Strahlung und β -Strahlung:
Beide Arten wechselwirken im Wesentlichen mit Materie durch Stöße mit den Elektronen der Atomhülle. Dabei wird das Atom angeregt oder ionisiert. Oder sie interagieren durch Ablenkung im elektrischen Feld der Atomkerne, dabei wird Röntgenbremsstrahlung erzeugt. Die He-Kerne der α -Strahlung wirken stark ionisierend. Wegen ihrer großen Masse wird die Strahlung kaum abgelenkt. Die β -Strahlung wird wegen ihrer geringeren Masse leichter abgelenkt und es kommt zur Bremsstrahlung.
 - γ -Strahlung:
Es kommen drei Prozesse in Betracht: der Fotoeffekt, der Comptoneffekt und Paarbildung. Die Paarbildung erfordert eine Mindestenergie von 1,02 MeV. Das Photon erzeugt im elektrischen Feld des Atomkerns ein Elektron-Positron-Paar. Die Wechselwirkung der γ -Strahlung mit Materie ist geringer als die der geladenen Teilchen.

Nachweis radioaktiver Strahlung

- Radioaktive Strahlung wirkt beim Auftreffen auf Materie ionisierend, d. h. aus einem Atom werden Elektronen herausgelöst, das entstehende Ion ist positiv geladen, oder das Atom fängt Elektronen ein, das entstehende Ion ist negativ geladen. Diese Eigenschaft wird zum Nachweis radioaktiver Strahlung eingesetzt.
- Ionisationskammer:**
In einer abgeschlossenen Kammer befindet sich Gas und ein radioaktives Präparat. Legt man zwischen dem Gehäuse und dem Präparat eine Hochspannung an, so wird das Füllgas durch die radioaktive Strahlung des Präparats ionisiert und zu den Elektroden beschleunigt. Ein Ionisationsstrom kann gemessen werden. Dieser steigt mit wachsender Spannung an und ist ab einem bestimmten Spannungswert konstant. Dieser Sättigungswert dient als Maß für die Intensität der Strahlung.

- Geiger-Müller-Zählrohr:**
Es ist eine Weiterentwicklung der Ionisationskammer. In die Kammer wird ein Metallrohr mit Drahtelektrode eingeführt. Das Füllgas befindet sich unter vermindertem Druck.



Die Strahlung ionisiert die Atome des Gases und es werden Elektronen freigesetzt. Diese werden zur Drahtelektrode beschleunigt. Auf ihrem Weg ionisieren sie weitere Atome, so dass die Anzahl der Elektronen stark anwächst. Es kommt zu einem Stromstoß, der einen Spannungsimpuls hervorruft.

Da die positiv geladenen Ionen träge sind, vergeht einige Zeit, bis der nächste Spannungsimpuls entsteht. Die Ionen halten sich länger an der Drahtelektrode auf als die Elektronen und es entsteht eine positiv geladene Wolke um den Draht. Diese schirmt das angelegte elektrische Feld ab und die Ladungserzeugung wird gestoppt. Diese Zeit nennt man Totzeit. Die Spannungsimpulse werden mit einem Oszilloskop sichtbar oder mit einem Lautsprecher hörbar gemacht.

Weitere Detektorarten

- **Nebelkammer:**

Mit ihr kann man die Bahn der radioaktiven Strahlung sichtbar machen. Dazu befindet sich Luft, die mit Wasser- oder Alkoholdampf gesättigt ist, in einer Kammer. Senkt man nun den Druck in der Kammer, so kühlt die Luft schnell ab. Die Ionen wirken wie Kondensationskeime, um die sich Wassertröpfchen bilden und machen so die radioaktive Strahlung sichtbar. Je länger die entstehende Spur, umso energiereicher die Strahlung.

- **Halbleiterdetektor:**

Legt man an eine Diode, deren p-n-Schicht breit ist, eine Spannung, so wird die Diode in Sperrrichtung gepolt. Die ionisierende Strahlung erzeugt in der p-n-Schicht Elektronen-Loch-Paare und damit einen Stromstoß, der einen Spannungsimpuls hervorruft. Die Anzahl der erzeugten Elektronen-Loch-Paare ist ein Maß für die Energie der Strahlung.

- **Szintillationszähler:**

Trifft ionisierende Strahlung auf einen Szintillationskristall, so werden Lichtblitze hervorgerufen. Diese treffen auf eine Fotoelektrode, die durch den Photoeffekt Elektronen freisetzt. Die Elektronen treffen auf Photomultiplier und setzen weitere Elektronen frei. Die Anzahl der Elektronen steigt lawinenartig an. Dieser Elektronenstrom ruft einen Spannungsimpuls hervor, der ein Maß für die Energie der Strahlung ist.

Bindungsenergie-Massendefekt

- Vergleicht man die Masse eines Atomkerns mit der Gesamtmasse seiner Nukleonen, so ist die Masse des Kerns stets kleiner als die Summe aller Nuklidmassen. Diesen Massenunterschied nennt man **Massendefekt**:

$$\Delta m = m_{\text{Nukleonen}} - m_{\text{Kern}}$$

- Nach der Relativitätstheorie entspricht der Massendifferenz ein Energiebetrag von $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Dieser Energiebetrag wird bei der Bindung der Nukleonen frei. Da die Energie abgegeben wird, wird sie als negativ angegeben.
Wird dieser Energiebetrag dem Kern zugeführt, so wird er in seine Nukleonen zerlegt.
- Die Bindungsenergie hängt ab von der Anzahl der Nukleonen. Dividiert man die Bindungsenergie durch die Anzahl der Nukleonen, so erhält man die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon. Sie liegt in der Größenordnung von -8MeV . Im Bereich der Massenzahl 60 hat die Bindungsenergie ein Minimum.
- **Berechnung** der Bindungsenergie am Beispiel des Alphateilchens:
Da das Alphateilchen aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, gilt für die Summe der Teilchen:

$$2 \cdot (m_p + m_n) = 2 \cdot (1,008665\text{u} + 1,007276\text{u}) = 4,031882\text{u}.$$

Für die Masse eines Alphateilchens gilt: $m_{\text{Alpha}} = 4,001506\text{u}$.

Damit ergibt sich für den Massendefekt:

$$\Delta m = m_{\text{Nukleonen}} - m_{\text{Kern}} = 4,031882\text{u} - 4,001506\text{u} = 0,030376\text{u}.$$

Mit $u = 1,6605 \cdot 10^{-27}\text{kg}$ und $c = 2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ folgt: $u \cdot c^2 = 931,5\text{MeV}$

und für die Bindungsenergie:

$$\Delta E = -\Delta m \cdot c^2 = 0,030376 \cdot u \cdot c^2 = -0,030376 \cdot 931,5\text{MeV} = -28,295\text{MeV}.$$

Kernmodelle

- Da sich die Protonen aufgrund der Coloumbkraft gegenseitig abstoßen, muss es eine weitere Kraft geben, die diese Abstoßung kompensiert. Dieser Sachverhalt wurde durch das Tröpfchenmodell erklärt.
- **Tröpfchenmodell:**
Man geht davon aus, dass die Nukleonen im Atomkern so zusammengefügt sind wie die Moleküle in einem Wassertropfen. Sie werden durch die starke Wechselwirkung zusammengehalten.

Die **starke Wechselwirkung** hat folgende Eigenschaften:

- Sie ist unabhängig von der Ladung.
- Sie ist sehr viel stärker als die Coulombkraft zwischen den Protonen.
- Ihre Reichweite ist in der Größenordnung von 10^{-15}m , d.h. sie wirkt nur zwischen benachbarten Nukleonen.

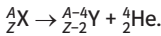
Mit dem Tröpfchenmodell lassen sich die Kernradien recht gut vorhersagen, es macht aber keine Aussagen darüber, wie groß die einzelnen Anteile der Bindungsenergie sind.

- Ein quantenmechanisches Modell für die Beschreibung der Nukleonen im Kern ist das Potenzialtopfmodell. Dabei handelt es sich um das einfachste Modell für gebundene Zustände.
- **Potenzialtopfmodell:**
Die Einschränkung des Aufenthaltsbereiches führt zu diskreten Energieniveaus. Der Kernradius ist durch den starken Abfall der potenziellen Energie gekennzeichnet.
Das Potenzial innerhalb des Kerns ist konstant, außerhalb des Kerns hat es den Wert null.
Wegen der abstoßenden Coulombkraft sind die Energieniveaus für Protonen etwas höher als für Neutronen. Nach dem Pauli-Prinzip ist jedes Niveau mit höchstens zwei Nukleonen besetzt.

Zerfallsarten

- **α -Zerfall:**

Ein α -Teilchen wird in Form eines Heliumkernes, bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen, ausgesendet. Dabei verringert sich die Ordnungszahl des Kerns um zwei, die Massenzahl um vier Einheiten:



Hat das Teilchen die Kernkräfte überwunden, wird es von den Protonen im Kern abgestoßen. Es wird im elektrischen Feld zwischen den Protonen und Elektronen beschleunigt und erhält kinetische Energie.

Berechnungen ergeben eine wesentlich größere kinetische Energie als die Messungen.

Erst die Betrachtung des α -Teilchens als Quantenobjekt klärt diesen Widerspruch.

- **α -Zerfall im Potenzialtopfmodell:**

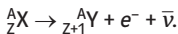
Zwei Protonen und Neutronen verbinden sich zu einem α -Teilchen, dabei wird Bindungsenergie frei. Damit das α -Teilchen den Kern verlassen kann, sind rechnerisch ca. 25MeV notwendig. Messungen zeigen aber, dass die tatsächlich benötigte Energie geringer ist.

Aufgrund der Heisenberg'schen Unschärferelation kann das Teilchen die Energiebarriere überwinden. Diese Eigenschaft nennt man Tunneleffekt.

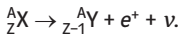
- **β -Zerfall:**

Man unterscheidet den β^- -Zerfall und den β^+ -Zerfall.

Beim β^- -Zerfall wird im Kern ein Neutron in ein Proton umgewandelt und ein Elektron sowie ein Antineutrino emittiert. Die Ordnungszahl erhöht sich um 1 und die Massenzahl bleibt konstant:



Beim β^+ -Zerfall wird ein Proton in eine Neutron und ein hochenergetisches Positron umgewandelt und das Positron sowie ein Neutrino emittiert. Die Ordnungszahl verringert sich um 1, die Massenzahl bleibt konstant:



Zerfallsgesetz

- Man kann nicht vorhersagen, wann ein stabiler Kern zerfällt, man kann nur die Wahrscheinlichkeit angeben, wann ein Kern innerhalb des nächsten Zeitabschnitts zerfallen wird. Erst bei einer großen Anzahl radioaktiver Kerne kann man mathematische Vorhersagen treffen.

- Man nimmt an, dass die **Zerfallsrate** $\frac{\Delta N}{\Delta t}$, also die Anzahl der zerfallenden Teilchen ΔN im Zeitabschnitt Δt der Anzahl der zum Zeitpunkt t vorhandenen Kerne $N(t)$ proportional ist.

Mit der Zerfallskonstanten λ folgt:

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda \cdot N(t).$$

Die Änderungsrate ist negativ, da die Anzahl der Kerne abnimmt.

Für $\Delta t \rightarrow 0$ erhält man die Differenzialgleichung:

$$\dot{N}(t) = -\lambda \cdot N(t) \text{ mit der Lösung } N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}.$$

Dabei ist $N(0)$ die Zahl der zum Zeitpunkt $t = 0$ vorhandenen Kerne.

$N(t)$ nimmt mit der Zeit exponentiell ab.

- Die **Halbwertszeit** ist ein Maß für die unterschiedliche Lebensdauer der Kerne. Es ist die Zeit, die vergangen ist, bis sich die Anzahl der Kerne halbiert hat.

$$\text{Es gilt: } N(T_{1/2}) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} = \frac{1}{2}N(0) \text{ und } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

- Unterschiedliche Isotope zerfallen in gleichen Zeitabschnitten unterschiedlich schnell. Dieses Verhalten wird durch die Aktivität beschrieben. Die **Aktivität** ist der Quotient aus der Anzahl der zerfallenen Kerne und der dazu benötigten Zeit Δt . Sie entspricht dem Betrag der Zerfallsrate:

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}.$$

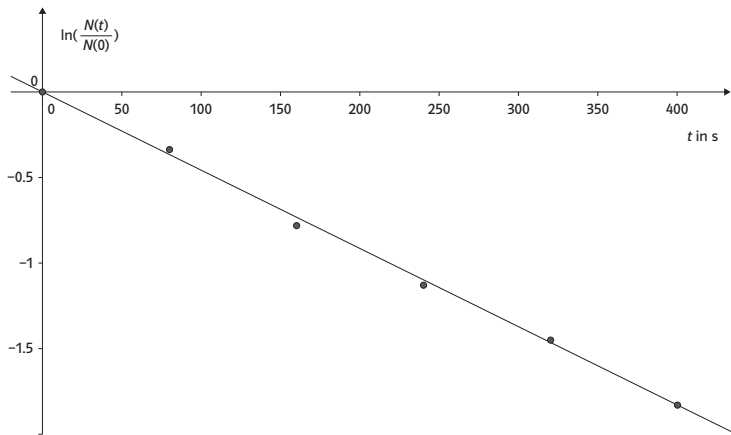
Die Einheit der Aktivität ist das Becquerel (Bq): $1\text{Bq} = 1 \frac{\text{Kernzerfall}}{\text{Sekunde}}$.

Aufgabe zum Zerfallsgesetz

- Die folgende Messreihe beschreibt das um den Nulleffekt bereinigte Verhältnis $\frac{N(t)}{N(0)}$.

t in s	0	80	160	240	320	400
$\frac{N(t)}{N(0)}$	1	0,713	0,460	0,322	0,230	0,161

Trägt man $\ln\left(\frac{N(t)}{N(0)}\right)$ gegenüber der Zeit t auf, so ergibt sich folgendes Diagramm:



Für das Zerfallsgesetz gilt: $N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

Dies kann man umformen zu $-\lambda \cdot t = \ln\left(\frac{N(t)}{N(0)}\right)$.

Da im Diagramm $\ln\left(\frac{N(t)}{N(0)}\right)$ gegenüber t aufgetragen ist, entspricht λ der Steigung der Ausgleichsgeraden.

Für die Steigung gilt: $\lambda = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{-1,83}{400\text{s}} = 4,6 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$.

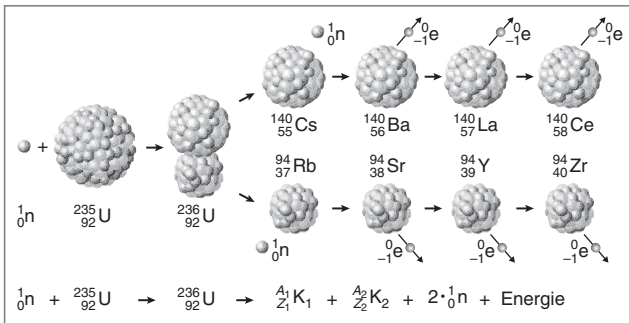
Damit kann man die Halbwertszeit berechnen: $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 151\text{s} = 2,5\text{min}$.

Kernspaltung

- Bei der Kernspaltung entstehen aus einem schweren Kern zwei größere Bruchstücke.
- Uran-235 ist das einzige natürlich vorkommende Nuklid, das durch ein langsames Neutron gespalten werden kann. Bei ihm ist die Aktivierungsenergie kleiner als die freiwerdende Bindungsenergie.
- Bei der Spaltung von U235 können als Spaltprodukte Barium und Krypton entstehen:

$${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{56}^{139}\text{Ba} + {}_{36}^{95}\text{Kr} + 2{}_0^1n$$

$${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{56}^{139}\text{Ba} + {}_{36}^{94}\text{Kr} + 3{}_0^1n$$
 Es sind noch weitere Spaltprodukte möglich.



- **Abschätzung der Energiegewinnung pro Spaltung:** Für Uran-235 beträgt die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon etwa 7,5MeV, für die Bruchstücke ca. 8,4MeV. Damit wird $(8,4\text{MeV} - 7,5\text{MeV}) \cdot 23 \approx 200\text{MeV}$ an Energie frei. Davon entfallen etwa 170MeV auf die kinetische Energie der Spaltprodukte, die dann die innere Energie und damit die Temperatur des Spaltmaterials erhöht.
- Bei dieser Kernspaltung entstehen zusätzlich zwei bis drei freie Neutronen. Lösen diese weitere Kernspaltungen aus, so steigt die Anzahl der Spaltprodukte exponentiell an. Es kann zu einer unkontrollierten **Kettenreaktion** kommen. Dazu ist jedoch notwendig, dass die Neutronen wieder auf spaltbare Atomkerne treffen. Die Masse des spaltbaren Materials muss groß genug sein. Für Uran-235 muss die **kritische Masse** bei kugelförmiger Anordnung ca. 50kg betragen.

Standardmodell der Elementarteilchen

- Elementarteilchen sind die Grundbausteine der Materie. Bis 1932 waren das Elektron, Proton, Neutron und Photon bekannt. Dann wurden das erste Antiteilchen und das Positron entdeckt. Seitdem wurden immer mehr Teilchen gefunden, wobei fast zu jedem Teilchen ein Antiteilchen existiert.
- Es wurden zwei Teilchenfamilien eingeführt, die **Leptonen** (leichte Teilchen) und die **Hadronen** (schwere Teilchen). Die Hadronen wurden zusätzlich in zwei Unterfamilien, die **Mesonen** und **Baryonen**, unterteilt.

Gruppe		Name	Masse in MeV	Ladung in $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Lebensdauer in s	nachgewiesen
		Photon γ		-	∞	1905
Leptonen		Elektron e^-	0,511	-1	stabil	1897
		Myon μ^-	105,7	-1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	1937
		Anti-Elektronneutrino $\bar{\nu}_e$	0	0	stabil	1956
		Myonneutrino ν_μ	0	0	stabil	1962
Hadronen	Mesonen	Pion π^-	139,6	-1	$2,6 \cdot 10^{-8}$	1947
		Kaon K^+	493,7	+1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	1949
		Eta-Null η^0	548,8	0	$2,5 \cdot 10^{-19}$	1960
	Baryonen	Proton p	938,28	+1	stabil	1886
		Neutron n	939,57	0	918	1932
		Lambda-Null Λ^0	1115,6	0	$2,6 \cdot 10^{-10}$	1953
		Sigma-Plus Σ^+	1189,4	+1	$0,8 \cdot 10^{-10}$	1953
		Sigma-Stern-Minus Σ^{*-}	1385	-1	$1,3 \cdot 10^{-23}$	1960
		Delta-Null Δ^0	1235	0	$0,4 \cdot 10^{-23}$	1952
		Xi-Stern-Minus Ξ^{*-}	1385	-1	$0,5 \cdot 10^{-22}$	1962
Omega-Minus Ω^-	1672	-1	$1,3 \cdot 10^{-10}$	1964		

- Die **Hadronen** setzen sich aus noch kleineren Teilchen, den **Quarks**, zusammen. Es sind sechs Arten von Quarks bekannt.

Alle Baryonen und Mesonen setzen sich aus Zweier- und Dreierkombinationen dieser Quarks zusammen. Nach dem Pauli-Prinzip müssen sich diese Teilchen in mindestens einer Quantenzahl unterscheiden. Die Quantenzahlen Ladung und Spin reichen dafür nicht aus, deshalb führte man die Farbladung ein.

Flavour		Massen in MeV	Ladung in e	Spin
up	u	≈ 5	+2/3	$\frac{1}{2}$
down	d	≈ 10	-1/3	$\frac{1}{2}$
strange	s	≈ 100	-1/3	$\frac{1}{2}$
charm	c	≈ 1500	+2/3	$\frac{1}{2}$
bottom	b	≈ 4200	-1/3	$\frac{1}{2}$
top	t	$\approx 120\,000$	+2/3	$\frac{1}{2}$