

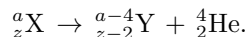
# Einführung in die Radioaktivität

<b>Atomkern</b>	Gebundenes System aus $a$ Nukleonen.
<b>Nukleon</b>	Sammelbegriff für Proton ( ${}^1_1\text{p}$ ) und Neutron ( ${}^1_0\text{n}$ ).
<b>Proton</b>	Positiv geladenes Teilchen. Der Betrag der elektrischen Ladung des Protons entspricht der Elementarladung.
<b>Neutron</b>	Neutrales Teilchen.
<b>Elektron, Positron</b>	Das Elektron $e^-$ und das Positron $e^+$ sind Elementarteilchen, die ebenfalls die Elementarladung tragen und bis auf das Vorzeichen der Ladung in allen Eigenschaften übereinstimmen. Ihre Massen $m_e$ sind um ein Vielfaches kleiner als die Massen der Nukleonen, z.B. die Masse des Protons $m_p$ .

$$m_p \approx 10000 m_e$$

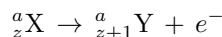
<b>Ordnungszahl, Kernladungszahl</b>	Anzahl $z$ der Protonen im Atomkern und damit Zahl der Elektronen in der Hülle des neutralen Atoms.
<b>Neutronenzahl</b>	Anzahl $n$ der Neutronen im Atomkern.
<b>Massenzahl</b>	Gesamtzahl $a = z + n$ der Nukleonen im Atomkern.
<b>Nuklid</b>	Kernart mit festen Zahlenwerten von $z$ und $a$ : ${}^a_z\text{X}$ ; Beispiele: ${}^{16}_8\text{O}$ , ${}^{60}_{27}\text{Co}$ , ...
<b>Isotope</b>	Atomkerne mit gleicher Ordnungszahl $z$ , aber verschiedener Neutronenzahl $n$ (Beispiel: die Sauerstoffisotope ${}^{15}_8\text{O}$ , ${}^{16}_8\text{O}$ und ${}^{17}_8\text{O}$ ). Isotope sind chemisch im Wesentlichen äquivalent. Nur Prozesse, die von der Masse abhängen, zeigen für Isotope ein leicht unterschiedliches Verhalten (Unterschiede in den physikalisch-chemischen Gleichgewichten, Unterschiede in der Diffusionsgeschwindigkeit, Isotopieverschiebungen in den Atomspektren, ...). Diese Erscheinungen werden als Isotopieeffekte bezeichnet.

<b>Radioaktivität</b>	Unter Radioaktivität versteht man den spontanen Zerfall radioaktiver Atomkerne. Dabei werden $\alpha$ -, $\beta$ - oder $\gamma$ -Strahlen ausgesandt.
<b><math>\alpha</math>-Strahlung</b>	Emission von Helium-Kernen der Massenzahl $a = 4$ und der Kernladungszahl $z = 2$ : ${}^4_2\text{He}$ . Die Bilanzgleichung eines $\alpha$ -Zerfalls sieht dementsprechend wie folgt aus:

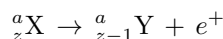


Typische Energien der  $\alpha$ -Teilchen liegen zwischen 4 MeV und 9 MeV.

<b><math>\beta</math>-Strahlung</b>	$\beta$ -Strahlung besteht aus schnell fliegenden Teilchen kleiner Masse (Positronen, Elektronen), die in elektrischen oder magnetischen Feldern stärker als $\alpha$ -Strahlen abgelenkt werden. Beim $\beta^-$ -Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um und sendet dabei ein Elektron aus.
-------------------------------------	--



Beim  $\beta^+$ -Zerfall wandelt sich ein Proton in ein Neutron um und sendet dabei ein Positron aus.



<b><math>\gamma</math>-Strahlung</b>	Kurzwellige elektromagnetische Strahlung (noch kurzwelliger als die Röntgenstrahlung). $\gamma$ -Strahlung wird in elektrischen oder magnetischen Feldern nicht abgelenkt. Es werden keine Teilchen emittiert, Anzahl und Verteilung der Nukleonen bleibt konstant.
--------------------------------------	---

## Absorptions- Unterscheidung der Strahlenarten

Die  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen dringen verschieden stark in Materie ein. Die Strahlen geladener Teilchen ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) lassen sich wegen ihrer kurzen Reichweite wesentlich einfacher abschirmen. Die energiereichsten  $\alpha$ -Teilchen von Radionukliden mit etwa 10 MeV Energie können nur etwa 0.1 mm tief in Muskelgewebe eindringen und die  $\beta$ -Teilchen von Radionukliden mit 5.5 MeV Energie nur etwa 3 cm tief. Die  $\gamma$ -Strahlung als kurzwellige elektromagnetische Welle hat dagegen eine hohe Reichweite. Dadurch ergeben sich auch verschiedene Anwendungen in der Medizin sowie entsprechende Schutzmaßnahmen.

Als Faustregel gilt:

- $\alpha$ -Strahlung wird bereits durch ein Blatt Papier abgeschirmt.
- $\beta$ -Strahlung wird z.B. durch eine dünne Metallplatte abgeschirmt.
- $\gamma$ -Strahlung wird erst durch eine dicke Bleiplatte abgeschwächt.

Soll aber Teilchenstrahlung abgeschirmt werden, so darf nicht nur deren Reichweite berücksichtigt werden. So werden beispielsweise  $\beta$ -Strahlen beim Eindringen in Materie abgebremst; die Energiedifferenz wird als elektromagnetische Strahlung ausgesandt. Auch diese Bremsstrahlung muss abgeschirmt werden!

## Zerfallsgesetz

Wie bisher beschrieben emittieren Radionuklide Strahlung. Bei Teilchenemission ( $\alpha$ -,  $\beta$ -Strahlung) zerfallen sie gleichzeitig in andere Nuklide. Die Anzahl der Zerfallsakte pro Zeiteinheit ist proportional zur Zahl der noch vorhandenen Teilchen. Immer wenn die Änderung einer Größe auch dem jeweiligen Wert proportional ist, lassen sich Verminderung oder Wachstum dieser Größe durch eine Exponentialfunktion beschreiben. Das Zerfallsgesetz lautet hier

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

Hierin ist  $N(t)$  die Zahl der nicht zerfallenen Atome und  $N(t=0)$  die Zahl der nicht zerfallenen Atome zur Zeit  $t=0$ .  $\lambda$  ist die Zerfallskonstante ( $[\lambda] = \text{s}^{-1}$ ). Der Exponent im Zerfallsgesetz hat ein negatives Vorzeichen, da die Zahl  $N(t)$  mit zunehmender Zeit  $t$  abnimmt.

## Aktivität

Maß für die Zerfallsrate eines Radionuklids. Sie berücksichtigt nicht die biologische Wirksamkeit der Strahlungsarten. Die Aktivität  $A$  gibt die Anzahl der Zerfälle  $N$  pro Zeit  $t$  an:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N(t) = \lambda N(0) \cdot e^{-\lambda t} = A(0) \cdot e^{-\lambda t}$$

Die SI-Einheit der Aktivität ist  $[A] = 1 \text{ Bq (Becquerel)} = 1 \text{ Zerfall pro Sekunde}$ . Die früher benutzte Einheit von 1 Ci (Curie) ist historisch entstanden und entspricht der Anzahl der Zerfälle von 1 g  $^{226}\text{Ra}$  pro Sekunde:  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ .

## Physikalische Halbwertszeit

Die physikalische Halbwertszeit  $t_{1/2}$  nennt man die Zeit, in der die Zahl der nicht zerfallenen Atome eines radioaktiven Nuklids auf die Hälfte zerfallen ist. Sie kann für verschiedene Isotope Werte zwischen  $10^{-7} \text{ s}$  und  $10^{10} \text{ Jahren}$  besitzen. Nach der doppelten (dreifachen) Halbwertszeit ist die Zahl der nicht zerfallenen Atome auf  $N(0)/4$  (bzw.  $N(0)/8$ ) zurückgegangen.

## Biologische Halbwertszeit

Die biologische Halbwertszeit gibt die Zeit an, in der eine im Körper vorhandene Aktivität durch Ausscheidung auf die Hälfte vermindert wird. Im Allgemeinen ist diese Zeit für jedes Organ bei gleichem Radionuklid verschieden. Calcium ist ein wesentlicher Bestandteil der Knochen. Es wird laufend aus der Nahrung extrahiert, im Skelett eingebaut und später wieder ausgeschieden. Gelangt das Nuklid  $^{45}\text{Ca}$  in den Körper, so nimmt es an diesem Kreislauf teil. Es würde im Organismus während der biologischen Halbwertszeit von etwa 50 Jahren verbleiben. Seine physikalische Halbwertszeit beträgt jedoch nur etwa 165 Tage. Umgekehrt liegen die Verhältnisse beim Radionuklid  $^{14}\text{C}$ : Seine physikalische Halbwertszeit beträgt 5730 Jahre, seine biologische Halbwertszeit jedoch nur etwa 35 Tage. Das Kohlenstoff-Isotop hat den Körper also bereits wieder verlassen, bevor ein merklicher Anteil physikalisch zerfallen konnte.

**Absorptionsgesetz**

Beim Durchtritt durch Materie der Dicke  $d$  wird die  $\gamma$ -Strahlung ebenfalls exponentiell abgeschwächt. Das hieraus folgende Absorptionsgesetz lautet,

$$N_P(d) = N_P(d=0) \cdot e^{-\mu d}.$$

Hierin heißt  $\mu$  Absorptionskoeffizient oder linearer Abschwächungskoeffizient und  $N_P$  repräsentiert die vom Präparat herrührende gemessene Impulszahl. Das Absorptionsgesetz ist analog zum Lambert-Beer'schen Gesetz beim Lichtdurchgang durch eine Farbstofflösung.

**Halbwertsdicke**

Die Halbwertsdicke  $d_{1/2}$  eines Materials ist definiert als die Strecke, welche die Strahlung im Material zurücklegen muss, bis die Impulszahl auf die Hälfte des Wertes beim Eintritt abgefallen ist,

$$N_P(d_{1/2}) = \frac{1}{2} \cdot N_P(d=0).$$

Besitzt ein Absorber z. B. die doppelte (dreifache) Dicke seiner Halbwertsdicke, so durchdringt ihn nur ein Viertel (ein Achtel) der ursprünglichen Strahlung.

**Abstandsgesetz**

Die radioaktive Strahlung wird von der Quelle in alle Richtungen ausgesandt und breitet sich geradlinig aus. Falls die Quelle relativ zum Abstand klein ist, kann sie als punktförmig angenommen werden. Unter dieser Voraussetzung nimmt die vom Präparat herrührende Impulszahl  $N_P$  mit dem Quadrat des Abstands  $R$  vom Präparat ab:

$$N_P \propto \frac{1}{R^2}.$$

**Nulleffekt  $N_0$** 

Auch wenn man alle radioaktiven Quellen aus der Umgebung des Zählrohrs entfernt, zählt dieses dennoch eine gewisse (geringe) Zahl  $N_0$  von Impulsen. Sie wird durch die kosmische Strahlung (Höhenstrahlung) sowie durch Spuren radioaktiver Substanzen im Zählrohrmaterial verursacht.

**Ionendosis  $D_q$** 

$$D_q = \frac{\text{durch Ionisation entstehende Ladung}}{\text{Masse der durchstrahlten Materie}}$$

$$[D_q] = 1 \text{ C/kg} = 1 \text{ A} \cdot \text{s/kg}; 1 \text{ R (Röntgen)} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}.$$

**Energiedosis  $D_E$** 

$$D_E = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse der durchstrahlten Materie}}$$

$[D_E] = 1 \text{ Gy (Gray)} = 1 \text{ J/kg}$ ; bis 1985 wurde das „rad“ verwendet:  $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$ . Energiedosis und Ionendosis lassen sich ineinander umrechnen, da die aus der Strahlung absorbierte Energie proportional zur dadurch entstandenen Ladung ist. Für Luft gilt beispielsweise:  $1 \text{ R} = 0.87 \text{ rad}$ .

**Dosisleistung**

Die pro Zeit aufgenommene Ionen- bzw. Energiedosis.

**biologische  
Schädlichkeit**

Die Einwirkung radioaktiver Strahlung auf lebendes Gewebe kann verschieden starke Schäden zur Folge haben. Diese beruhen auf der Inaktivierung von Enzymen, der Auslösung von Mutationen, der Bildung von Ionen und vor allem von freien Radikalen.

Die biologische Schädlichkeit hängt dabei nicht nur von der Menge der absorbierten Energie bzw. der Menge der entstandenen Ionen (also von  $D_E$  und  $D_q$ ) ab, sondern auch von der Strahlenart. Bei gleicher Energie sind  $\alpha$ -Strahlen wesentlich gefährlicher als  $\beta$ -Strahlen und  $\gamma$ -Strahlen. Zur Berücksichtigung der biologischen Schädlichkeit wird der Bewertungsfaktor  $Q$  eingeführt. Er beträgt für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung 1, für  $\alpha$ -Strahlung können  $Q$  Werte zwischen 10 und 20 angenommen werden.

## Äquivalentdosis

Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirksamkeit von verschiedenen Strahlungsarten:

$$H = Q \cdot D_E$$

Die Einheit der Äquivalentdosis ist gleich der Einheit der Energiedosis (da  $Q$  dimensionslos ist).

Zum Unterscheiden der beiden Größen wurde aber eine weitere Einheit eingeführt:  $[H] = 1 \text{ Sv (Sievert)} = 1 \text{ J/kg}$ . Bis 1979 diente das „rem“ als Einheit für die Äquivalentdosis:  $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$ .

1 rad entspricht 1 rem für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen.

1 rad entspricht 10 bis 20 rem für  $\alpha$ -Strahlen.

## Anwendung in der Medizin

In der Medizin finden radioaktive Nuklide bei der Diagnostik und der Therapie Verwendung. Die nuklearmedizinische Diagnostik verwendet in der Regel die  $\gamma$ -Strahlung und zwar *in vivo* zur Lokalisationsdiagnostik durch Szintigraphie (z. B. zur Tumorlokalisation) und zur Funktionsdiagnostik (z. B. der Nieren, der Lungen, und der Schilddrüse) und *in vitro* zur Labordiagnostik (z. B. zur Markierung von Hormonen mit radioaktiven Nukliden (Insulinbestimmung)).

In der nuklearmedizinischen Therapie werden radioaktive Nuklide hauptsächlich zur Bestrahlung von Geschwulsterkrankungen von außen oder durch Implantate eingesetzt. Eine gezielte Bestrahlung einzelner Organe kann durch die Lokalisierung der Wirkung über Implantation im betreffenden Organ oder durch Anreicherung radioaktiv markierter Stoffe im betreffenden Organ über den natürlichen Stoffwechselvorgang erreicht werden. In beiden Fällen werden die gewünschten hohen lokalen Bestrahlungsdichten erreicht.

## Zu beachtende Schutzmaßnahmen

Ungenügende Kenntnis über den Strahlenschutz bringt Gefahren für den Patienten und den behandelnden Arzt. Daher unterliegt die Anwendung solcher Verfahren strengen gesetzlichen Bestimmungen.

Drei Grundregeln (AAA-Regeln) sind beim Arbeiten mit radioaktiven Strahlungsquellen von höchster Wichtigkeit:

- Abschirmen der radioaktiven Quelle, z. B. durch Blei der Dicke  $d$  !  
Aus dem Absorptionsgesetz folgt:

$$H \propto e^{-d}.$$

- Aufenthaltsdauer  $t$  in der Nähe radioaktiver Quellen möglichst kurz halten!

Ist die Änderung der Aktivität und die Absorption vom Abstand  $R$  vernachlässigbar, kann davon ausgegangen werden, dass die absorbierte Äquivalentdosis proportional zur Aufenthaltsdauer ist.

$$H \propto t$$

- Abstand  $R$  zu radioaktiven Quellen möglichst groß halten!  
Aus dem Abstandsgesetz folgt:

$$H \propto \frac{1}{R^2}$$