

Radioaktivität

Kim Boström

I. STRAHLUNGSARTEN

α -Zerfall

- Spontane Emission eines Heliumkerns (2 Protonen + 2 Neutronen).
Restkern: Massenzahl -4, Ordnungszahl -2.

β -Zerfall

- Spontane Verwandlung eines Kern-Neutrons in ein Proton: Emission 1 Elektron + 1 Neutrino.
Restkern: Massenzahl konstant (Elektronen und Neutrinos wiegen fast nichts.), Ordnungszahl +1.

Der Restkern ist meistens ebenfalls instabil und zerfällt nach einer gewissen Zeit. Die resultierende Kette von α - und β -Zerfällen bildet die *Zerfallsreihe*, an deren Spitze ^{238}U , ^{232}Th oder ^{235}U steht. Es gibt also 3 Zerfallsreihen mit Massenzahl $4n$, $4n + 2$, $4n + 3$. Die Reihe mit $4n + 1$ kommt in der Natur nicht vor, da kein Glied der Reihe eine genügend lange Lebensdauer hat. Alle Bestandteile der Reihe sind längst abgebaut.

γ -Strahlung

- γ -Strahlung ist sehr hartes Licht, d.h. elektromagnetische Strahlung mit einer Frequenz von etwa 10^{20} Hz, dem entspricht eine Wellenlänge von etwa 1 pm. (Röntgenstrahlung: 10^{18} Hz $\hat{=}$ 1 nm.)
- γ -Strahlen werden beim α - und β -Zerfall emittiert.

II. GEFÄHRLICHKEIT

Radioaktive Strahlung ist sehr gefährlich. Sie ionisiert Atome in einer Körperzelle und erzeugt dadurch Zellgifte und freie Radikale. Dies kann zum *Strahlentod* der Zelle führen. Außerdem wird die Erbsubstanz (DNA) beschädigt, was fatale Spätfolgen haben kann (Krebs, Erbschäden).

- **α -Strahlen** bestehen aus schweren Teilchen die beim Zusammenstoß mit den Atomen des Körpers großen Schaden anrichten. Sie haben aber nur eine sehr kurze Reichweite und schlechte Durchdringung. Nach wenigen Zentimetern in der Luft brechen die Strahlen abrupt ab, in fester Materie sogar nur nach wenigen Mikrometern. Der Grund: Ein schnelles Teilchen verliert weniger Energie als ein langsames: Es bleibt kürzere Zeit im Einflussbereich der Teilchen mit denen es zusammenstößt.
- **β -Strahlen** reichen etwas weiter als α -Strahlen, sind aber weniger energiereich.
- **γ -Strahlen** haben sehr lange Reichweite und lassen sich sehr schlecht abschirmen. (Auch zentimeterdicke Bleischichten helfen nicht besonders.) Grundsätzlich gilt: In freier Luft nimmt die Strahlung *quadratisch* mit dem Abstand ab, in isolierender Materie (z.B. Blei) *exponentiell*. γ -Strahlen sind sehr gefährlich, weil hartes Licht (ähnlich wie UV-Licht oder Röntgenstrahlung) die DNA beschädigt und Atome ionisiert.

Kurzgefaßt: α -Strahlen sind extrem gefährlich, wenn sie in den Körper gelangen (Kontamination). Auf Entfernung sind sie ungefährlich und lassen sich sehr leicht abschirmen. β -Strahlen reichen etwa genauso weit wie α -Strahlen, sind aber weniger energiereich. γ -Strahlen sind auch auf die Entfernung gefährlich, weil sie weit reichen und schlecht abzuschirmen sind.

III. ZERFALLSGESETZ

Ein instabiler Atomkern zerfällt nach einer gewissen Zeit. Wann ein bestimmtes Atom zerfällt ist absolut zufällig, jedoch gibt es ein statistisches Gesetz, das *Zerfallsgesetz*, welches die Wahrscheinlichkeit eines Zerfalls bestimmt. Dieses lautet

$$P(t) = e^{-\Gamma t}, \quad (1)$$

es handelt sich also um ein *exponentielles* Gesetz. Zum Zeitpunkt $t = 0$ ist das Atom noch nicht zerfallen ($P(0) = 1$), die Wahrscheinlichkeit dass es nicht zerfallen ist nimmt aber exponentiell ab. Wenn also zu irgendeinem Zeitpunkt N_0 instabile Atome vorliegen, dann gibt es davon zur Zeit t noch

$$N(t) = N_0 e^{-\Gamma t} \quad (2)$$

Atome. Die zugehörige Differentialgleichung lautet

$$dN = -\Gamma N dt, \quad (3)$$

d.h. im Zeitraum von dt Sekunden sind $dN = -\Gamma N$ Atome zerfallen, wobei Γ die *Zerfallskonstante* genannt wird. Die Anzahl von Zerfällen pro Zeit ist die *Zerfallsrate*,

$$\nu = \frac{dN}{dt}. \quad (4)$$

Die Zeit τ nach der die Zahl der instabilen Atome auf $1/e$ abgenommen hat, wird als *mittlere Lebensdauer* bezeichnet,

$$\frac{N_0}{e} = N_0 e^{-\Gamma \tau}. \quad (5)$$

Wie man leicht sieht ergibt sich

$$\tau = \frac{1}{\Gamma}. \quad (6)$$

Die Zeit $T_{1/2}$ nach der sich die Zahl der instabilen Atome auf die Hälfte reduziert hat, wird als *Halbwertszeit* bezeichnet,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\Gamma T_{1/2}}. \quad (7)$$

Mittlere Lebensdauer und Halbwertszeit unterscheiden sich also nur um einen Faktor von $\ln 2$,

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\Gamma} = \ln 2 \cdot \tau \approx 0.7 \cdot \tau. \quad (8)$$

Da die einzelnen Zerfallsprozesse der Atome *unabhängig* voneinander stattfinden, handelt es sich um einen *Poisson-Prozess*. Die Wahrscheinlichkeit für n Zerfälle pro Sekunde lautet

$$p_n = \frac{\nu^n}{n!} e^{-\nu}. \quad (9)$$

Die Zerfallsrate ν offenbart sich also als die *mittlere* Anzahl von Zerfällen pro Zeit,

$$\nu = \left\langle \frac{dN}{dt} \right\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} p_n \cdot n = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \frac{\nu^n}{n!} e^{-\nu}. \quad (10)$$

Die einzelnen Zerfälle entsprechen den Klicks eines Geigerzählers. Für die relative Abweichung vom Mittelwert ν gilt

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{1}{\sqrt{\nu}}. \quad (11)$$

Also je mehr Zerfälle, desto geringer die relative Abweichung.

Kurzgefaßt: Der Zerfall eines radioaktiven Atoms ist unvorhersagbar und findet nach einem *exponentiellen Zerfallsgesetz* statt. Die Zeit nach der die Hälfte der Atome zerfallen sind, ist die *Halbwertszeit*. Ihr Kehrwert mal $\ln 2$ ist die *Zerfallskonstante*. Eine Ansammlung von Atomen zerfällt unabhängig voneinander, die Anzahl von Zerfällen pro Zeit hat die statistischen Eigenschaften eines *Poisson-Prozesses*. Dies hört man durch unregelmäßige Klicks im Geigerzähler.

IV. WIE MISST MAN RADIOAKTIVITÄT?

Es gibt viele verschiedene Wege, Radioaktivität zu messen. Grundsätzlich mißt man *Aktivität* oder *Dosis*. Hierbei gilt:

- **Aktivität:** Auf die Strahlungsquelle bezogen.
 1 Bq = Becquerel = 1 Zerfall pro Sekunde.
 Ältere Maßeinheit: 1 Ci = 1 Curie = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq. 1 Curie entspricht der Aktivität von 1g Radium.
- **Dosis:** Auf das Absorptionsmedium bezogen.
 - **Ionendosis:** substanzunabhängig.
 Ionisierte Ionenpaare pro Masse, 1 R = 1 Röntgen.
 1 R = 1 elektrostatische einheit ($3 \cdot 10^9$ As) wird ionisiert in 1 cm^3 Luft bei 1 bar und 20°. Also 1 R = $2,58 \cdot 10^{-4}$ As/kg. Die Einheit Röntgen ist *substanzunabhängig*.
 - **Energiedosis:** substanzabhängig.
 Absorbierte Strahlungsenergie pro Masse, 1 J/kg.
 Durch Multiplikation der Ionendosis mit der mittleren Ionisierungsenergie der Substanz findet man die zugehörige Energiedosis. Die ist dann *substanzabhängig*. Für Luft findet man 1 R \rightarrow 0.0084 J/kg, für Wasser 1 R \rightarrow 0.01 J/kg = 1 rd = 1 rad. Die Energiedosis für Wasser entspricht in etwa der Energiedosis für den menschlichen Körper. Weil der so wichtig ist, gibt man dieser Größe eine eigene Einheit, nämlich 1 Gy = 1 Gray.
 - **Dosisäquivalent:** substanzabhängig.
 Dosisäquivalent = Energiedosis \cdot Qualitätsfaktor.
 Dieser Qualitätsfaktor wird festgelegt auf

Strahlung	QF
α	10
β	1
γ	1

Weil der QF dimensionslos ist, ist die Dimension des Dosisäquivalents dieselbe wie bei der Energiedosis, jedoch nennt man sie anders, nämlich 1 Sv = 1 Sievert, was 1 Gray entspricht.

Kurzgefaßt: Die Strahlungsbelastung ist *substanzabhängig* und wird gerne in *Sievert* (Sv) gemessen. 1 Sievert = 1 Röntgen mal mittlere Ionisierungsenergie von Wasser. Eine wichtige Größe ist auch die *Dosisleistung*, die als Dosis pro Zeit veranschlagt wird. Der Mensch sollte eine Strahlendosis von höchstens 0.05 Sv pro Jahr aufnehmen. Dies entspricht im Mittel $5,7 \cdot 10^{-6}$ Sv/h.

Hier die Strahleneffekte nach kurzzeitiger Ganzkörperbestrahlung des Menschen mit γ -Strahlung:

Dosis	Wirkung
< 0.5 Sv	Geringe vorübergehende Blutbildveränderungen
0.8-1.2 Sv	Übelkeit und Erbrechen in 10% der Fälle
4-5 Sv	Todesfälle 50% innerhalb von 30 Tagen, Erholung der Überlebenden nach 6 Monaten
5.5-7.5 Sv	Tödliche Dosis, Todesfälle 100%
50 Sv	Schwere Nervenschädigungen, Tod innerhalb einer Woche