

V700 Natürliche Radioaktivität

Ziel: Es sollen natürlich vorkommende Radionuklide nachgewiesen und deren Eigenschaften untersucht werden.

Stichworte: Absorption, Aktivität, α -Strahlung, β -Strahlung, γ -Strahlung, Geiger-Müller-Zählrohr, Halbwertszeit, Isotope, natürliche Radioaktivität, Neutronen, Nuklide, Protonen, radioaktiver Zerfall, Tochterkern, Zerfallsreihe

Theoretische Grundlagen

Ein Atomkern setzt sich aus Protonen und Neutronen zusammen. Bei einem neutralem Atom ist die Anzahl der Protonen gleich der Anzahl der Hüllenelektronen. Kerne mit definierter Massenzahl und Kernladungszahl werden Nuklide genannt.

Für eine einheitliche Kennzeichnung ist neben dem Elementsymbol X die Ordnungszahl und die Massenzahl notwendig. Nuklide mit gleicher Protonenzahl und unterschiedlicher Neutronenzahl werden Isotope genannt, so sind z.B. ^{12}C und ^{14}C zwei Kohlenstoffisotope. Nuklide können stabil oder instabil sein, bei



$A = Z + N$ Massenzahl
 Z Ordnungszahl, Anzahl der p
 N Anzahl der n

letzteren gehen die Kerne durch einen radioaktiven Zerfall in einen anderen Zustand oder einen anderen Kern über. Der radioaktive Kern kann dabei α -Strahlung, β -Strahlung oder γ -Strahlung aussenden. Bei der α - und β -Strahlung findet eine Kernumwandlung statt, das radioaktive Nuklid X geht durch Kernumwandlung in den Tochterkern Y über. Bei der α -Strahlung wird vom Atomkern ein ^4_2He -Kern (das α -Teilchen) ausgestrahlt.



Bei der β -Strahlung geht ein Neutron in ein Proton (β^- -Strahlung) bzw. ein Proton in ein Neutron (β^+ -Strahlung) über.



Bei der γ -Strahlung findet keine Kernumwandlung statt. Hierbei geht der Atomkern durch Aussendung von elektromagnetischer Strahlung (γ -Strahlung) von einem angeregten Zustand in einen tiefer liegenden Zustand über. Damit der Kern in einem angeregten Zustand sein kann muß ein anderer Kernprozeß, z.B. ein α - oder β -Zerfall, vorangegangen sein. Häufig wird ein γ -Zerfall auch von einem α -Zerfall oder einem β -Zerfall begleitet, sodaß ein Radionuklid mehrere Zerfallskanäle besitzen kann.

Ein Radionuklid kann nicht nur mehrere Zerfallskanäle besitzen, es kann auch in einen anderen instabilen Tochterkern übergehen, der wiederum instabil sein kann. Dies geschieht so lange, bis solche Zerfallsreihen in einem stabilen Kern enden. Da sich die Massenzahl nur bei einem α -Zerfall ändert, lassen sich die Massenzahlen der drei natürlich vorkommenden Zerfallsreihen durch die Formeln $4n$ (Thorium Reihe), $4n + 2$ (Uran-Radium-Reihe) und $4n + 3$ (Uran-Aktinium-Reihe) kennzeichnen, wobei n eine natürliche Zahl ist. Diese drei natürlich vorkommenden Zerfallsreihen haben sehr große Halbwertszeiten und stammen wahrscheinlich aus der Entstehungsgeschichte der Erde ab. Eine vergleichsweise geringe Halbwerts-

zeit von $\tau = 2.144 \cdot 10^6 a$ hat die Plutonium-Neptunium Reihe mit $4n + 1$. Diese hat auf Grund der geringen Halbwertszeit kein natürliches Vorkommen mehr auf der Erde. In der nebenstehenden Abbildung ist die Thorium Zerfallsreihe mit ihren Zerfallskanälen dargestellt. Die Zerfallsreihe hat ^{232}Th als erstes instabile Nuklid und endet im stabilen ^{208}Pb Isotop.

Der radioaktive Zerfall ist ein statistischer Prozess. Die Radionuklide wandeln sich unabhängig voneinander um. Hierdurch kommt es zu zeitlichen Schwankungen in der Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit. Der radioaktive Zerfall gehorcht der Poisson Statistik und somit sind die statistischen Schwankungen durch die Standardabweichung $\sigma = \sqrt{N}$ der Poisson Statistik gegeben, wobei N die Anzahl der Zerfälle ist.

Radionuklide besitzen eine charakteristische mittlere Lebensdauer τ , die je nach Nuklid im Millisekundenbereich aber auch bei 10^{20} Jahre liegen kann. Die Größe $\lambda = 1/\tau$ wird als Zerfallskonstante bezeichnet. Ist N_0 die Zahl der anfangs vorhandenen Kerne, so sind nach der Zeit t noch

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

radioaktive Kerne vorhanden. Eine anschaulichere Größe ist die Halbwertszeit $T_{1/2}$. Sie gibt an, in welcher Zeit die Hälfte des Ausgangsmaterials zerfallen ist. Sie ist mit der Zerfallskonstanten λ und der mittleren Lebensdauer τ über

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2 \quad (4)$$

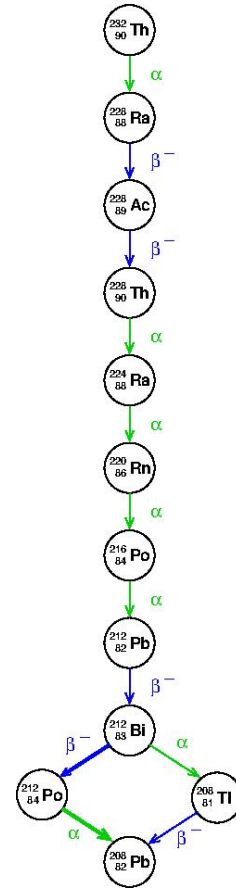
verbunden.

Um die Intensität angeben zu können, wie stark radioaktives Material strahlt, wird die Aktivität A definiert. Die Aktivität

$$A = \frac{N}{\Delta t} \quad (5)$$

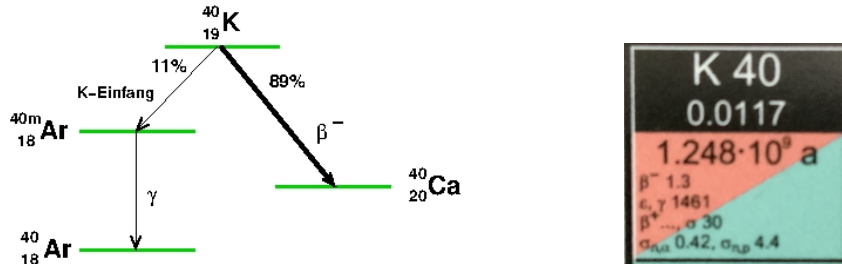
gibt die Anzahl der radioaktiven Zerfälle N pro Zeiteinheit Δt an und wird in Becquerel [$\text{Bq} = 1/\text{s}$] gemessen.¹ Um z.B. die Aktivität von Nahrungsmitteln angeben zu können, wird zusätzlich noch die spezifische Aktivität definiert. Die spezifische Aktivität ist die Aktivität pro Masse. So beträgt z.B. die typische spezifische Aktivität von ^{226}Ra in Milch 0.01 Bq/kg und die typische spezifische Aktivität von Paranüssen liegt zwischen 8 Bq/kg und 130 Bq/kg bezogen auf das Frischgewicht[1].

Die Art sowie die Isotopenhäufigkeit der verschiedenen Zerfallskanäle kann genauso wie die Zerfallskonstanten und Energien der Nuklidkarte entnommen werden. In den folgenden Abbildungen ist ein Ausschnitt aus der Nuklidkarte für das radioaktive Isotop ^{40}K zu sehen, sowie die Zerfallskanäle mit den Häufigkeiten. In der Natur kommen drei Kaliumisotope vor. Die stabilen Nuklide ^{39}K und ^{41}K mit einer Isotopenhäufigkeit von 93.2581 % bzw. 6.7302 %, sowie das instabile ^{40}K Nuklid mit einer Isotopenhäufigkeit von nur 0.0117 %. Trotz der

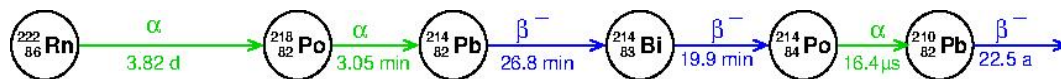


¹Achtung!!! Die Einheit [Bq] ist NICHT mit der Einheit [Hz] zu verwechseln!!!

geringen Häufigkeit stellt das ^{40}K Isotop ein beachtenswertes Radionuklid dar, da es mit 0.0117 % in jeder Kaliumverbindung vorkommt. So beträgt z.B. der Kaliumgehalt im Menschen 2 g pro kg Körpergewicht. ^{40}K hat eine sehr lange Halbwertszeit, es zerfällt zu 89 % mit einer Halbwertszeit von $\tau = 1.248 \cdot 10^9 \text{ a}$ unter Aussendung von β^- -Strahlung in den stabilen ^{40}Ca Kern. Zu 11 % erfolgt ein Übergang durch den Einfang eines Elektrons in das stabile ^{40}Ar .



In der Natur gibt es verschiedene Ursachen für das Vorkommen von Radionukliden. So können kosmogene Radionuklide wie z.B. ^3H , ^{14}C oder ^{22}Na durch kosmische Strahlung in der Erdatmosphäre gebildet werden. Außerdem können durch die bereits erwähnten natürlichen Zerfallsreihen ständig Radionuklide mit geringer Halbwertszeit gebildet werden. So enthalten alle drei Zerfallsreihen ein Radioisotop des Edelgases Radon. Die drei radioaktiven Isotope von Radon ^{219}Rn , ^{220}Rn und ^{222}Rn haben dabei sehr unterschiedliche Halbwertszeiten von ein paar Sekunden bis zu wenigen Tagen. Das ^{222}Rn kann sich innerhalb seiner Lebensdauer in der Luft und im Mauerwerk von Häusern verteilen bevor es weiter zerfällt. In der unten stehenden Graphik ist ein Ausschnitt aus der Uran-Radium Zerfallsreihe zu sehen, dessen Radionuklide aufgrund ihrer Lebensdauern für eine natürliche Radioaktivität in Luft, Wasser und dem Erdboden verantwortlich sind. Eine weitere Ursache für das Vorkommen von natürlichen Radionukliden sind Isotope mit einer sehr langen Halbwertszeit, die häufig durch nur einen Zerfallsschritt in ein stabiles Nuklid übergehen. Ein Beispiel für so ein langlebiges Radionuklid ist das bereits erwähnte ^{40}K , das zusammen mit ^{87}Rb das häufigste Radionuklid im menschlichen Körper ist.



Vorbereitung

Vervollständigen Sie mit Hilfe einer Nuklidkarte die folgende Tabelle.

Radionuklid	$T_{1/2}$ [a]	λ [s^{-1}]	Häufigkeit [%]	spezifische Aktivität [Bq/g]
^{40}K				
^{232}Th				
^{235}U				
$^{235}\text{U}^*$				
^{238}U				

Versuchsaufbau

Kernstück des Experiments ist ein Geiger-Müller-Zählrohr (*Ranger*) mit einem großen Detektorfenster, das es ermöglicht neben β - und γ -Strahlung auch α -Strahlung zu messen. Das sehr empfindliche Fenster ist durch eine Kappe geschützt, die Sie abnehmen können, wenn α -Strahlung gemessen werden soll. Bitte setzen Sie die Schutzkappe auf das Detektorfenster wenn nicht gemessen wird. Die Kontamination des Gerätes durch Berühren des Detektorfensters aus Mica sollte vermieden werden, ebenso wie der Kontakt mit Wasser oder anderen Flüssigkeiten. Vermeiden Sie auch direkte Sonneneinstrahlung auf das Detektorfenster, da diese die Messung beeinflussen kann.

Das Geiger-Müller-Zählrohr *Ranger* kann α -, β - und γ -Strahlung detektieren aber **nicht unterscheiden**. Die Unterscheidung der Art der Strahlung muß indirekt über das **Absorptionsvermögen** geschehen. α -Strahlung hat in Luft nur eine geringe Reichweite und kann durch ein Blatt Papier abgeschirmt werden. Um die Anzahl der α -Zerfälle zu identifizieren, wird ein oder mehrere Blätter Papier zwischen die Probe und dem Detektorfenster gelegt. Eine andere und für das Geiger-Müller-Zählrohr schonender Möglichkeit, ist das **Aufsetzen der Schutzkappe**. β -Strahlung hat eine größere Reichweite und kann durch Kunststoff oder **Aluminium** geringer **Schichtdicke (ca. 1 cm)** absorbiert werden. Die radioaktiven Zerfälle, die dann noch detektiert werden, werden von **γ -Strahlung im Geiger-Müller-Zählrohr** hervorgerufen.

Die Reichweite von α -Strahlung in Luft beträgt wenige cm. Damit α -Strahlung gemessen werden kann, sollte das Geiger-Müller-Zählrohr **möglichst nah an der zu untersuchenden Probe** platziert werden. Damit das Detektorfenster bei der Messung nicht zerstört wird, wird das Geiger-Müller-Zählrohr auf ein 1 cm hohes Gestell gelegt, in dessen Mitte sich die verschiedenen Proben platzieren lassen.

Neben dem Geiger-Müller-Zählrohr stehen **verschiedene natürliche radioaktive Quellen**, wie zB. Uranglas oder Dünger, sowie Materialien (Filter, Bechergläser,...), um Radionuklide aus der Raumluft oder aus Wasser zu extrahieren, zur Verfügung.



Aufgaben und Versuchsdurchführung

Machen Sie sich mit der Handhabung des Geiger-Müller- Zählrohres vertraut. Das Messgerät wird durch Drücken der *Power-Taste* angestellt. Drücken Sie die Taste so lange, bis ein Piepton zu hören ist. Nach dem Einschalten wird ein kurzer Selbsttest durchgeführt. Das Gerät ist betriebsbereit, wenn die Dosisleistung angezeigt wird. Mit der Funktionstaste *MODE* können verschiedene Einheiten ausgewählt werden. Mit der Funktionstaste **COUNT** ist es möglich die Anzahl der **radioaktiven Zerfälle pro Zeitintervall** zu messen. Zum Einstellen der Messdauer muß die Funktionstaste *COUNT* gedrückt werden. Im LCD-Display erscheint die aktuelle Messzeit. Diese Zeit kann mit der Funktionstaste *MENU* (Stunde, Minuten, Sekunde) und den Funktionstasten *Plus* und *Minus* verändert werden. Die Messung wird mit der *Power Taste* gestartet. Für die meisten Messungen müssen Sie die **Schutzkappe abnehmen**. Setzen Sie nach Beendigung jeder Messreihe die **Schutzkappe auf das Geiger-Müller-Zählrohr**.

Aufgabe 1: Bestimmung der Untergrundrate

Bestimmen Sie die **Untergrundrate an Ihrem Messplatz**. Stellen Sie hierzu das Geiger-Müller Zählrohr in die Halterung. Stellen Sie die Messzeit auf **10 Minuten** und starten Sie die Messung.

$N_0 =$ _____ Zerfälle pro 10 min

Aufgabe 2: Natürliche radioaktive Stoffe

Für diese Aufgabe stehen verschiedene Stoffe zur Verfügung. Je nach Aktivität der Stoffe beträgt die Messzeit **1 min, 3 min oder 10 min**. Die Messzeit sowie die Anzahl der Messungen pro radioaktiven Stoff befindet sich auf dem jeweiligen Probenbehälter. Wählen Sie **mindestens zwei Stoffe** aus, um diese auf radioaktive Strahlung zu untersuchen. Die Messzeit der ersten Probe sollte 1 min oder 3 min betragen. Bei der zweiten radioaktiven Probe sollte die Messzeit 10 min dauern. Stellen Sie am *RANGER* die Messzeit ein, die auf dem Probenbehälter steht. **Subtrahieren Sie von den Messergebnissen die Untergrundrate** und berechnen Sie die **Nettozählrate**. Stellen Sie mit Hilfe der **Absorber fest, um welche Art von radioaktiver Strahlung** es sich bei dem Stoff handelt. Da die Anzahl der Zerfälle auch von der Menge des untersuchten Materials abhängt, müssen die **untersuchten Stoffe gewogen** werden. Die **Nachweiswahrscheinlichkeit** des Geiger-Müller-Zählrohrs ist auf ^{137}Cs geeicht. Abhängig von **Energie und Strahlungsart** der ionisierenden Strahlung muß die gemessene Zählrate mit einem **Korrekturfaktor** versehen werden. So beträgt z.B. die typische Energieeffizienz bei **1 MeV** gerade mal **25%** der gemessenen Zählrate. Die **Isotopeneffizienz von α -Strahlung** beträgt gerade mal **0.0420**. Die gemessenen Zählraten werden in der Regel unterschätzt.

2.1 Radioaktives Material mit kurzer Messzeit

Material: _____

Messzeit: _____

Gewicht: _____

Messung	1	2	3	4	5
N_0 Untergrund [Bq/g]					
N ohne Abschirm. [Bq/g]					
N_P mit Papier [Bq/g]					
N_{Alu} mit Alu [Bq/g]					
Anteil an α -Strahlung [%]					

Ziehen Sie von den Zählraten den Untergrund ab, **mitteln Sie die Zählraten** und berechnen Sie die **Messunsicherheit**. Ermitteln Sie den **Anteil an α -Strahlung** und stellen Sie eine **Hypothese** auf, **welche Radionuklide** zerfallen sein könnten.

Interpretation:

2.1 Radioaktives Material mit 10 min Messzeit

Material: _____

Gewicht: _____

Untergrund: $N_0 =$ _____

ohne Abschirm.: $N =$ _____ $\Rightarrow N - N_0 =$ _____

mit Papier: $N_P =$ _____ $\Rightarrow N_P - N_0 =$ _____

mit Aluminium: $N_{Alu} =$ _____ $\Rightarrow N_{Alu} - N_0 =$ _____

Wie bei nur einem Wert? \sqrt{n}

Ziehen Sie von den **Zählraten den Untergrund** ab und berechnen Sie die Messunsicherheit. Ermitteln Sie den **Anteil an α -Strahlung** und stellen Sie eine Hypothese auf, welche Radionuklide zerfallen sein könnten.

Anteil an α -Strahlung: _____

Interpretation:

Aufgabe 3: Radioaktivität in der Raumluft

In der Luft befindet sich das **radioaktive Radon-222** und seine Tochterprodukte. Das im Erdboden erzeugte Edelgas Radon gelangt durch Spalten aus dem Boden in die Luft. Radon zerfällt unter **Aussendung von α -Strahlung in Pb-218** das wiederum mit einer Halbwertszeit von ca 3 Minuten unter Aussendung von **α -Strahlung in Pb-214** übergeht. Bei diesen Zerfällen erhalten die Pb-218 und Pb-214 Nuklide einen **Rückstoß** und die Atome verlieren außerdem noch ein **Elektron**. Die so erzeugten **Pb⁺-Ionen** können nun durch das **elektrische Feld eines aufgeladenen Luftballons** **angezogen und eingesammelt** werden.

- Stellen Sie eine Messzeit von 1 Minute am Geiger-Müller-Zählrohr ein.
- Messen Sie fünf mal die **Untergrundrate des Luftballons**.
- **Blasen Sie den Luftballon auf und binden Sie den Luftballon zu**, so daß Sie ihn später wieder öffnen können. Reiben Sie nun den **Luftballon mit dem Tuch aus Fleecestoff**, so dass er sich **elektrostatisch auflädt**. **Hängen Sie den Luftballon so auf**, dass er **frei schwebt** und sich **nicht entladen** kann. Am Besten in einem **nicht gelüfteten Raum oder im Keller**.
- Lassen Sie den Luftballon **ca. 20 min in der Luft hängen**.
- Lassen Sie die **Luft aus dem Luftballon entweichen**. Notieren Sie sich **25 Minuten lang in 1 Minuten Intervallen** die Anzahl der **radioaktiven Zerfälle**. Stellen Sie das Ergebnis graphisch dar. Bestimmen Sie aus der Kurve die **Halbwertszeit** und damit das **zerfallene radioaktive Nuklid**.

Messung	1	2	3	4	5
Untergrund pro min					

$\bar{N}_0 =$ _____

Zeit [min]	N [min^{-1}]	$N - N_0$ [min^{-1}]	Zeit [min]	N [min^{-1}]	$N - N_0$ [min^{-1}]
1			14		
2			15		
3			16		
4			17		
5			18		
6			19		
7			20		
8			21		
9			22		
10			23		
11			24		
12			25		
13			26		

Interpretation:

Literatur

- [1] Martin Volkner, Radioaktivität und Strahlenschutz, Informationskreis KernEnergie 2005
- [2] Hanno Krieger, Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes, Teubner 2007