

Natürliche Radioaktivität A12

Ziel des Versuches

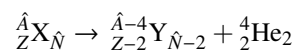
Radioaktivität wird anhand von vorwiegend natürlich vorkommenden Zerfallsprozessen untersucht. Dazu gehören sowohl die Statistik des Zerfalls als auch das Kennenlernen der relevanten Messgrößen und der Grundlagen der Dosimetrie. Es werden u.a. der Radonzerfall, der Zerfall des Isotops ^{40}K , Uranglas, Auernetze und das Absorptions- und Abstandsgesetz untersucht.

Theoretischer Hintergrund

Radioaktivität

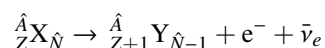
Radioaktivität ist die spontane Umwandlung instabiler Atomkerne in stabile Nuklide. Dies kann direkt oder in mehreren Schritten, bei denen zuerst wieder instabile Kerne gebildet werden, erfolgen. Bei der Umwandlung werden Teilchen (α , β^- , β^+) und/oder Photonen (γ) emittiert. Die verschiedenen Atome teilt man in Untergruppen ein, die sogenannten Nuklide. Ein bestimmtes Nuklid hat die gleiche Nukleonenzahl \hat{A} (Summe von Protonen und Neutronen) und eine bestimmte Neutronenzahl \hat{N} . Die Differenz $Z = \hat{A} - \hat{N}$ nennt man Kernladungszahl (oder Ordnungszahl). Diese gibt die Zahl der Protonen im Kern und die Zahl der Elektronen in der Hülle an, da das gesamte Atom elektrisch neutral ist.

Schwere Elemente können sich unter Aussendung eines α -Teilchens, dies ist ein zweifach geladener He-Kern, in ein anderes Element umwandeln:



Die α -Strahlung hat eine sehr geringe Reichweite und wird z. B. bereits durch ein Stück Papier absorbiert.

Atomkerne mit einem ungünstigen Neutronen-Protonen Verhältnis wandeln sich durch β -Zerfall oder durch Elektroneneinfang um. Die Elektronenemission aus dem Kern wird als β^- -Strahlung und die Aussendung von Positronen als β^+ -Strahlung bezeichnet. Als Alternative zum β^- -Zerfall kann auch ein Hüllenelektron vom Kern eingefangen werden. Für den β^- -Zerfall gilt:



bzw. ${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p}^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ (Neutronenüberschuss).¹ Entsprechend gilt für den β^+ -Zerfall: ${}_1^1\text{p} \rightarrow {}_0^1\text{n}^+ + e^+ + \nu_e$ (Protonenüberschuss) bzw. für den

¹ Es bildet sich hier ein stabilerer Kern, wenn ein Neutron in ein Proton umgewandelt wird. Dabei entsteht ein Elektron und ein Antineutrino.

Elektroneneinfang: ${}^1_1\text{p} + e^- \rightarrow {}^1_0\text{n}^+ + \nu_e$. Hierbei bezeichnet e^+ das Positron, ν_e das Neutrino und $\bar{\nu}_e$ das Antineutrino.

Bei Umwandlungen entstehen meist angeregte Kerne, die unter Aussendung von Photonen (γ) in den Grundzustand relaxieren. Mit der Änderung der Kernladungszahl ist zwangsläufig auch ein Umbau der Elektronenhülle erforderlich, bei der charakteristische Röntgenstrahlung entsteht.

Spontan ablaufende Kernumwandlungen sind von statistischer Natur. Bekannt ist immer nur die Wahrscheinlichkeit, mit der die Umwandlung eines Kerns innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls stattfindet. Die Anzahl dN der im Zeitintervall dt im Mittel stattfindenden Kernumwandlungen ist zu der Zahl N der vorhandenen instabilen Kerne proportional:

$$dN = -\lambda N dt \quad , \quad (1)$$

wobei λ die Zerfallskonstante des entsprechenden Nuklids ist. Der Kehrwert $\tau = 1/\lambda$ ist die mittlere Lebensdauer des Kerns. Trennung der Variablen und Integration von (1) liefern das bekannte exponentielle Zerfallsgesetz

$$N(t) = N(t=0) \exp(-\lambda t) \quad . \quad (2)$$

Die Zeit, nach der die Hälfte der instabilen Kerne umgewandelt ist, nennt man Halbwertszeit $T_{1/2}$. Mit $t = T_{1/2}$ lässt sich (2) folgendermaßen schreiben:

$$\frac{N(T_{1/2})}{N(t=0)} = \frac{1}{2} = \exp(-\lambda T_{1/2}) \quad ,$$

woraus sich sofort $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ ergibt.

Die Umwandlungsrate dN/dt , also die Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit, nennt man Aktivität A . Damit folgt aus (1):

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N(t) \quad . \quad (3)$$

Setzt man (2) in (3) ein und berücksichtigt die Beziehung $A(t=0) = \lambda N(t=0)$, so ergibt sich ein exponentieller Zusammenhang für das Abklingen der Aktivität zu:

$$A(t) = A(t=0) \exp(-\lambda t) \quad . \quad (4)$$

Die Maßeinheit für die Aktivität ist das Becquerel ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall/s}$).

Ionisierende Strahlung

In der Strahlenphysik spricht man dann von ionisierenden Teilchenstrahlen, wenn die Energie der betreffenden Teilchen ausreicht, um ein Elektron aus einem Atom oder Molekül herauszulösen. Das ist bereits bei Energien ab 10 eV gegeben. Zu den ionisierenden Strahlen gehören Alpha-, Beta-, Gamma-, Neutronen-, Röntgen- und Schwerionenstrahlung. α -Strahlen sind doppelt geladene He-Kerne, die hochenergetisch (4-9 MeV) sind und ein hohes Ionisationsvermögen aufweisen. Dafür sind sie leicht abschirmbar und haben eine geringe Reichweite, sodass man sich durch Abstandhalten von Strahlungsquellen wirkungsvoll schützen kann. β -Strahlen sind Elektronen/Positronen, die eine mittlere Reichweite aufweisen und mittelmäßig abschirmbar sind. γ - und Röntgenstrahlung sind elektromagnetische Strahlungen, die

eine große Reichweite aufweisen und schwer abschirmbar sind. Die γ -Strahlung hat teilweise Energien, die bis in den MeV-Bereich reichen. Die Wechselwirkung zwischen ionisierender Strahlung und der von ihr getroffenen Materie besteht in der Übertragung von Energie auf die Materie, wobei Ionen und Radikale gebildet werden, und in deren Folge chemische Reaktionen und Änderungen in der molekularen Struktur auftreten können. Die Wirkung der verschiedenen Strahlenarten auf den Organismus ist unterschiedlich, ebenso ist die Empfindlichkeit der einzelnen Organe verschieden. Während die Intensität der γ -Strahlung innerhalb absorbierender Materie einem exponentiellen Schwächungsgesetz unterliegt, ist das spezifische Ionisationsvermögen (Anzahl erzeugter Ionen pro Weglänge) von Schwerionenstrahlung am Ende ihrer Eindringtiefe am stärksten. Dieser Effekt wird z. B. in der Halbleitertechnologie oder in der Tumorthherapie ausgenutzt, um mm-genau im Tiefenprofil den gewünschten Effekt (Implantation bzw. Zelltod) zu erzeugen. Die schädigende Wirkung von Neutronenstrahlen beruht auf dem Heraus schlagen von Wasserstoffatomen (Stoßprozess mit gleichen Massen) aus organischen Molekülen.

Dosimetrie (Messgrößen)

Aktivität und Energiedosis

Die Aktivität

$$A = \frac{dN}{dt}$$

ist – wie oben bereits beschrieben – die Zerfallsrate (Anzahl Zerfälle pro Sekunde) eines Radionuklids² mit der Maßeinheit Bq (Becquerel). Nicht berücksichtigt wird durch die Aktivität die unterschiedliche biologische Wirksamkeit der Strahlungsarten.

Die Energiedosis D ist die absorbierte Strahlungsenergie E_D pro Masseinheit:

$$D = \frac{dE_D}{dm} = \frac{1}{\rho} \frac{dE_D}{dV}$$

und damit ein Maß für die physikalische Strahlenwirkung. Die Maßeinheit ist $[D] = 1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Gy (Gray)}$.³

Die Gesamtenergiedosis erhält man dann durch Integration der Energiedosis über das gesamte Volumen, d. h., man kann mit der Energiedosismessung eine Aussage über die Strahlungsbelastung erhalten.

Entsprechend ist dann die Energiedosisleistung die zeitliche Ableitung der Energiedosis.

Ionendosis und RBW-Faktor

Die direkte Energiedosismessung ist schwer zu realisieren, da eine Temperaturänderung durch Bestrahlung, wenn überhaupt, minimal ist. Man versucht daher, die Energiedosis indirekt über die Ionisation und so über die Ionendosis J zu bestimmen. Unter der Ionendosis versteht man den Quotienten aus der elektrischen Ladung Q der Ionen eines Vorzeichens, die in einem Luftvolumenelement dV_L durch die Strahlung erzeugt werden, und der Masse der Luft m_L in diesem Volumenelement. Die Ionendosis ist gegeben durch:

$$J = \frac{dQ}{dm_L} = \frac{1}{\rho_L} \frac{dQ}{dV_L}$$

² Ein instabiles Nuklid wird auch als Radionuklid bezeichnet.

³ Bis 1985 wurde die Maßeinheit rad verwendet: $1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 10^{-2} \text{ Gy}$.

und besitzt die Maßeinheit $[J] = 1 \text{ C/kg}$.⁴ Die Ionendosis ist leicht mit einer Ionisationskammer zu bestimmen.

Die Erfahrung zeigt aber auch, dass z. B. α -Strahlung bei gleicher Ionisation viel stärkere Auswirkung auf die biologische Materie hat als z. B. β -Strahlung. Dieses lässt sich durch die Verteilung der Ionisation erklären. Die Ionisationsdichte bei α -Strahlung ist längs der Bahn wesentlich höher als bei β -Strahlung. Da ein dichter Ionisationsbereich für die Zellen wesentlich schädlicher ist als eine Ionisation, die in der Zellstruktur weiter gestreut ist, muss ein weiterer Faktor in die Berechnung mit einbezogen werden. Da in der Strahlenbiologie der Vergleich mit der Wirksamkeit von Röntgenstrahlung von Interesse ist, bezog man sich bei der Normierung des Faktors auf die 200 keV-Röntgenstrahlung. Der Faktor, mit dem die Energiedosis bei einer beliebigen Strahlenart zu multiplizieren ist, um die Energiedosis zu erhalten, bei der man mit 200 keV-Röntgenstrahlen die gleiche biologische Strahlenwirkung erzielt, heißt „relative biologische Wirksamkeit“ und wird mit RBW-Faktor bezeichnet. Der RBW-Faktor ist aber von dem betrachteten biologischen Effekt, von der Art der Strahlung und ihrer Energie abhängig.

Äquivalentdosis und Bewertungsfaktor

Man führt den Begriff der Äquivalentdosis (auch als Organdosis bezeichnet) ein, um die Energiedosen verschiedener Strahlungsarten miteinander vergleichen zu können. Die Äquivalentdosis H ist gegeben durch $H = \sum w_R \cdot D_R$, wobei w_R der Strahlungswichtungsfaktor ist. Der Index R („radiation“) bezeichnet die Art der Strahlung. So hat der Strahlungswichtungsfaktor w_R den Wert 20 für α -Teilchen und den Wert 1 für β - und γ -Strahlung. Die Äquivalentdosis wird ebenfalls in J/kg ($1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Sv}$) gemessen und zur Unterscheidung von der Energiedosis in Sievert (Sv) angegeben.⁵

Die sogenannte effektive Äquivalentdosis oder effektive Körperdosis ist die Summe (nach Körperzusammensetzung) gewichteter sogenannter Organ-Äquivalentdosen. Die Organ-Äquivalentdosen berücksichtigen die unterschiedliche biologische Wirkung einer Strahlungsart auf die verschiedenen Organe unseres Körpers

Beispiele für Dosisleistungen aus der Umwelt

Die natürliche Strahlenexposition des Menschen ist die Summe aus kosmischer Strahlung in Bodennähe (0,3 mSv/a), terrestrischer Strahlung und Eigenstrahlung⁶ (0,3 mSv/a) und ergibt eine durchschnittliche Jahresdosis von ca. 2,5 mSv. Die terrestrische Strahlung ist abhängig vom Ort und wird als Ortsdosisleistung gemessen und liegt in Deutschland im Bereich von 0,02 $\mu\text{Sv/h}$ (0,17 mSv/a) bis 0,7 $\mu\text{Sv/h}$ (6 mSv/a).

Die Strahlenexposition eines Fluggastes auf einem Nordatlantikflug beträgt in 10.000 m Höhe 4 $\mu\text{Sv/h}$ (Äquivalentdosisleistung) und verdoppelt sich etwa bei einer Flughöhe von 12.000 m. Die effektive Äquivalentdosis pro Atlantiküberquerung beträgt dann etwa 0,05 mSv und entspricht der Strahlenexposition von einer Woche zu Hause.

Als weiterer Vergleich seien die Dosisleistungen von 2 mSv/h an der Oberfläche bzw. von 0,1 mSv/h in 2 m Abstand von einem Castor-Behälter genannt. Die Äquivalentdosis für einen Passanten in unmittelbarer Nähe wird mit 0,05 bis 0,1 mSv angegeben und ist damit vergleichbar mit einem Transatlantikflug oder einer Lungenröntgenaufnahme. Relativ hohe Äquivalentdo-

⁴ Früher wurde für die Ionendosis die Maßeinheit 1 R (Röntgen) = $2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$ verwendet.

⁵ Früher wurde für die Äquivalentdosis die Maßeinheit rem verwendet ($1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} = 1 \text{ Gy}$ Röntgenstrahlung (200 kV)).

⁶ Eigenstrahlung entsteht vorwiegend durch das im Körper vorhandene Kaliumisotop ^{40}K .

sen bis zu 10 mSv werden bei einer Computertomographie (CT) erreicht.

Statistik von Zählmessungen

Die Untersuchung des radioaktiven Zerfalls erfolgt über Zählmessungen.⁷ Die Zählrate $Z = x/t_m$, d. h., die Anzahl x der in einer bestimmten Messzeit t_m gezählten Impulse ist ein Maß für die Intensität der Strahlung und bei bekannter Effizienz η des Zählrohrs wegen $Z = \eta A$ auch ein Maß für die Aktivität. Der natürliche radioaktive Zerfall ist ein stochastischer Prozess, sodass nur Aussagen möglich sind, mit welcher Wahrscheinlichkeit Kerne in einer bestimmten Zeitspanne zerfallen. Generell ist die Wahrscheinlichkeit für das Zerfallen eines Atoms in der vorgegebenen Messzeit sehr klein. Die Wahrscheinlichkeit $P(x)$ für das Eintreffen seltener Ereignisse wird gut durch die Poisson-Verteilung beschrieben:

$$P(x) = \exp(-\bar{x}) \frac{(\bar{x})^x}{x!} . \quad (5)$$

Dabei ist x die jeweils während der Messzeit registrierte Impulszahl und \bar{x} der arithmetische Mittelwert. Für numerische Berechnungen eignen sich folgende Rekursionsformeln:

$$P(0) = \exp(-\bar{x}) \quad , \quad P(x) = P(x-1) \frac{\bar{x}}{x} .$$

Die Standardabweichung der Poisson-Verteilung ist $s = \sqrt{\bar{x}}$. Die Poisson-Verteilung ist also bereits durch einen Anpassungsparameter, den arithmetischen Mittelwert, festgelegt. Die Häufigkeitsverteilung ist für kleine Mittelwerte \bar{x} unsymmetrisch zum Mittelwert und wird mit größer werdenden Mittelwerten zunehmend symmetrischer. Sie geht für große Mittelwerte, also für $\|x - \bar{x}\| \ll \bar{x}$, in eine gaußsche Normalverteilung mit $\sigma^2 = \bar{x}$ über

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\} . \quad (6)$$

Zur Beschreibung der Gaußverteilung sind als Anpassungsparameter Mittelwert und Standardabweichung (Streuung $\sigma \approx s$) erforderlich. Bei umfangreichen Messreihen kann man, wie es auch für die Darstellung in einem Histogramm erforderlich ist, eine Klasseneinteilung für die Messwerte vornehmen. So muss man Mittelwert und Standardabweichung nicht mehr aus den einzelnen Messwerten x_i berechnen, sondern aus den Häufigkeiten der Messwerte in den einzelnen Klassen.

Experimentelles und Materialien

Geiger-Müller-Zählrohr

Das Geiger-Müller-Zählrohr ist ein Gasionisationsdetektor. Ein beidseitig verschlossener Metallzylinder (dünnwandiges Glas mit Metallbedampfung), der als Kathode dient, enthält eine Gasfüllung und einen in der Mitte entlang seiner Rotationssymmetrieachse gespannten Metalldraht als Anode. Einfallende ionisierende Strahlung erzeugt in der Gasfüllung freie Elektronen und Ionen, die aufgrund der zwischen Anode und Kathode anliegenden Gleichspannung zu den entsprechenden Elektroden beschleunigt werden. Ist die

⁷ Neben einfachen Zählmessungen kann man auch spektrometrische und koinzidente Zählmessungen durchführen, bei denen zusätzliche Kriterien, wie das zusätzliche Treffen eines Energie- oder Zeitfensters, berücksichtigt werden.

angelegte Detektorspannung entsprechend hoch (oberhalb von etwa 400 V), so kommt es bei einfallender ionisierender Strahlung in Anodennähe zu einer lawinenartigen Gasentladung durch Stossionisation. Es sind daher in diesem Spannungsbereich (man spricht vom Plateaubereich der Zählrohrcharakteristik) nur Zählmessungen möglich, die eine relativ einfache Nachfolgeelektronik benötigen. Nach einer Gasentladung, die einen Stromfluss zwischen Kathode und Anode und damit einen Zählimpuls auslöst, hat das Geiger-Müller Zählrohr eine Totzeit in der Größenordnung von etwa 0,1 ms, in der keine ionisierende Strahlung nachgewiesen werden kann.

Geiger-Müller Zählrohre sind vorwiegend zur Messung von β - und γ -Strahlung geeignet. Endfenster-Zählrohre mit dünnem Fenster können auch α -Strahlung detektieren.

Bestimmung einer unbekanntes Aktivität nach dem Relativverfahren

Ausgangspunkt ist die bekannte Aktivität A_1 eines Präparates, die eine Zählrate Z_1 hervorruft. Diese wird verglichen mit der Zählrate Z , die das Präparat mit der unbekanntes Aktivität A hervorruft. Dabei muss jedoch stets der sogenannte Nulleffekt berücksichtigt werden, der eine Untergrundzählrate Z_0 hervorruft. Es ergibt sich also:

$$A = A_1 \frac{Z - Z_0}{Z_1 - Z_0} \quad . \quad (7)$$

Wird jeweils die gleiche Messzeit t_m verwendet, so lässt sich wegen $Z = x/t_m$ die Formel (7) umschreiben in:

$$A = A_1 \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad .$$

Absorptions- und Abstandsgesetz

Trifft Strahlung auf einen Stoff, so tritt sie mit den Atomen im Material in Wechselwirkung. Dabei nimmt die einfallende Intensität I_0 der Strahlung nach Durchdringen einer Schichtdicke dz um den Betrag dI ab. Aus $dI = -\mu I dz$ mit μ als linearen Schwächungskoeffizienten ergibt sich nach Integration das exponentielle Schwächungsgesetz zu:

$$I = I_0 \exp(-\mu z) \quad . \quad (8)$$

Die Intensitäten I sind den jeweiligen Zählraten, von denen der Nulleffekt abgezogen wurde, proportional. Von Interesse ist oft die materialabhängige Halbwertsdicke $z_{1/2} = \ln 2 / \mu$, bei der die anfängliche Intensität auf die Hälfte abgeschwächt ist.

Geht man von einem punktförmigen Strahler aus, der gleichmäßig in alle Raumrichtungen strahlt, so bestrahlt er (von innen) gleichmäßig eine Kugeloberfläche. Da diese Kugeloberfläche O mit dem Abstand r gemäß $O = 4\pi r^2$ wächst, nimmt die Flächenleistungsdichte, also die Intensität, mit steigendem Abstand mit $1/r^2$ ab.

Radon

Beim Zerfall von Uran 238 zu Blei 206 entsteht als Zwischenprodukt Radium 226. Das Isotop des Elementes Radium (Ra 226) mit der Massenzahl 226

und der Ordnungszahl 88 hat eine Halbwertszeit von 1600 Jahren und zerfällt durch α -Zerfall in das Edelgas Radon (Rn 222, Ordnungszahl 86, HWZ= 3,8 Tage). Dadurch nimmt die Massenzahl um 4 und die Ordnungszahl um 2 ab. Zwischen Radium- und Radonkonzentration besteht immer ein Gleichgewicht. Radon 222 zerfällt unter Aussendung von α -Teilchen in Polonium (Po 218, Halbwertszeit 3,05 min), dieses wiederum in Blei 214 (Pb 214, Halbwertszeit 26,8 min). Pb 214 zerfällt unter Aussendung von beta-Strahlen in Wismut 214 (Bi 214, Halbwertszeit 19,9 min), dieses wiederum in Polonium 214 (Po 214, Halbwertszeit 16,4 μ s) und dieses schließlich in Blei 210 (Pb 210, Halbwertszeit 22 Jahre).

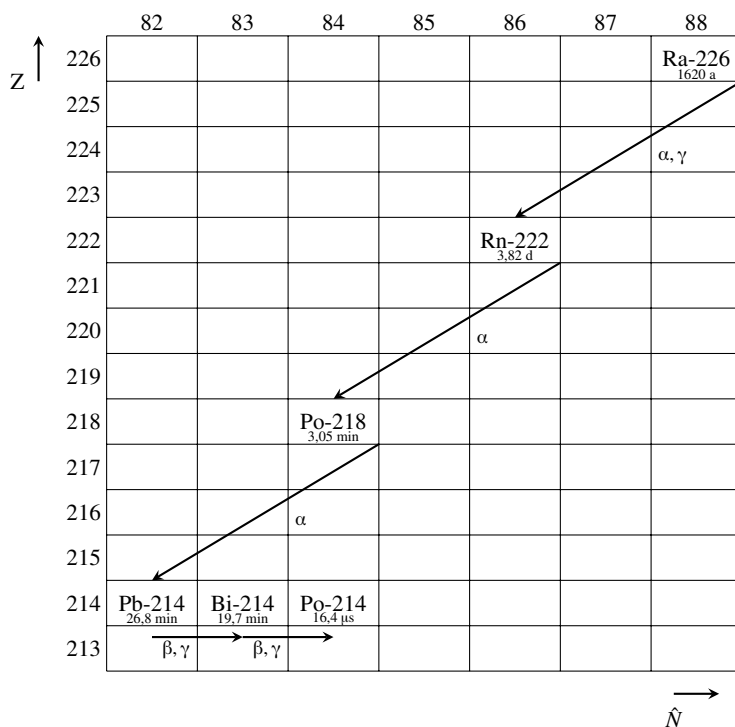


Abbildung 1: Radium-226 Zerfallsreihe

In der Zerfallsreihe Thorium 232 zu Blei 208 entsteht als Zwischenprodukt das Isotop Thorium 228. Beim Zerfall von Thorium (Th 228) entsteht ebenfalls Radium (Ra 224) und daraus das Radonisotop Rn 220 mit einer Halbwertszeit von 56 s. Dieses zerfällt in Polonium (Po 216, 0,15 s) und diese wiederum in Blei Pb 212 mit einer HWZ von 10 h. Bei der Messung des Radonzerfalls überlagern sich beide Zerfallsreihen, d. h., Sie finden stets einen „Untergrund“ mit einer HWZ von 10 h.

Es gibt etwa dreimal soviel Thorium wie Uran. Da Thorium eine dreimal höhere HWZ als Uran hat, ist die Anzahl der Zerfälle bedingt durch die Uran-Zerfallsreihe vergleichbar mit denen der Thorium-Zerfallsreihe.

In gebirgigen Gegenden ist die Radiumkonzentration höher als im Flachland. Demzufolge ist auch die Radonkonzentration dort entsprechend höher. Das im Boden befindliche Radongas dringt durch die Poren der Fundamente, bedingt durch den Schornsteineffekt, in die Häuser ein. Die Radonkonzentration ist daher in den Kellern der Gebäude oft deutlich höher als in den besser belüfteten oberen Stockwerken. Die Radonatome und ihre ionisierten Zerfallsprodukte lagern sich an Staub- und Aerosolteilchen in der Luft an.

Diese wiederum werden auf elektrostatisch aufgeladenen Flächen, wie z. B. an Röhrenbildschirmen, eingesammelt. Auch im Grundwasser finden sich Radonotope. Da in Bremen die Radonkonzentration sehr gering ist, nutzen wir daher einen sogenannten Kupferschlackestein als Radonquelle. Wie der Name schon aussagt, werden aus der bei der Kupferverhüttung entstehenden Schmelze Steine gegossen, die im Straßenbau eingesetzt werden.

Uranglas⁸

Farbiges Glas entsteht durch Metalloxide, die in die Glasschmelze eingebracht werden. Besonders kräftige, hellgelbe bis hellgrüne, transparente Farbtöne ergeben sich bei der Verwendung von Uranoxidverbindungen (Uran-IV-Oxid). Darüber hinaus fluoresziert das sogenannte Uranglas bei Beleuchtung mit UV-Licht. Bis in die ersten Dekaden des letzten Jahrhunderts wurde Uranglas u. a. für Kirchenfenster, Gebrauchsgegenstände wie Trinkgläser, Schalen und Knöpfe verwendet.

Kaliumchlorid

Das aus Bergwerken geförderte Kaliumchlorid enthält das Mineral Sylvin. Es wird gefördert, zermahlen und großtechnisch aufbereitet und dann vor allem als Kalidünger verwendet. KCl enthält zu 0,0118 % das radioaktive Isotop ^{40}K . Dieses Isotop zerfällt vor allem unter Aussendung von β -Strahlung (90 %) und etwas γ -Strahlung (10%) mit einer Aktivität von 15944 Bq pro kg und wird als Kalibrierstandard für β -Strahlung verwendet.

Auernetze (Glühstrümpfe)⁹

Da Gasflammen selbst kaum leuchten, mussten im Zeitalter der Gasbeleuchtung zusätzlich sogenannte Glühstrümpfe verwendet werden, die von Carl Auer von Welsbach 1885 erfunden wurden. Die Glühstrümpfe bestehen aus einem Baumwollgerüst mit Anteilen von Seide und Kunstseide, das mit Salzen präpariert ist. Wird die Flamme angezündet, verbrennt zuerst das Baumwollgerüst und es entsteht ein sehr sprödes und empfindliches Gerüst aus Salzoxiden. Diese Salzoxide leuchten in der Flamme sehr hell. Die Substanzen der Glühstrümpfe bestehen zu etwa 1 % aus seltenen Erden, vor allem aus CeO_2 (Ceroxid) und zu 99 % aus dem leicht radioaktiven ThO_2 (α -Strahler). In heutigen Glühstrümpfen, die man z. B. noch in Campinglampen finden kann, ist das ThO_2 durch das nicht-radioaktive Yttriumoxid ersetzt worden.

Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Messungen stehen Ihnen zwei Geiger-Müller Zählrohre zur Verfügung. Die Untersuchungen zur Statistik des radioaktiven Zerfalls und die Messung des Radonzerfalls werden jeweils mit dem Zählrohr, das an das CASSY-AD-Wandlersystem angeschlossen ist, durchgeführt.

Messung des Radonzerfalls¹⁰

Starten Sie eine Messung über 10 Minuten ohne Radonprobe, um die Nullrate¹¹ aufzuzeichnen. Um eine Radonprobe zu erhalten, stellen sie zuerst die

⁸ Die im Versuch verwendeten Uranglasknöpfe sind von der Landesmessstelle für Radioaktivität, die sich hier im Hause befindet, vermessen und zertifiziert worden und zeigen Aktivitäten unterhalb der Freigrenze.

⁹ Die im Versuch verwendeten klassischen Auernetze sind von der Landesmessstelle für Radioaktivität an der Universität Bremen vermessen und zertifiziert worden und zeigen Aktivitäten unterhalb der Freigrenze.

¹⁰ Diese Messung erfolgt in „Gruppenarbeit“ mit nur einem Versuchsplatz pro 10er Praktikumsgruppe, da es in Bremen und Umgebung sehr wenig Radon gibt.

¹¹ Die Nullrate bezeichnet den Strahlungsergrund, der durch Höhenstrahlung, terrestrische Strahlung, Körperstrahlung und durch Baumaterialien hervorgerufen wird.

Hochspannung ab und nehmen den Draht, an dem sich die Radonzerfallsprodukte angelagert haben, aus der Halterung. Ziehen Sie den elektrostatisch aufgeladenen Kupferdraht durch ein kleines, mit wenig Ethanol befeuchteten Papiertüchlein. Dieses Papiertüchlein ist dann Ihre zu untersuchende Radonprobe.¹²

Anschließend wird das Papiertüchlein mit den Radonzerfallsprodukten vor dem Zählrohr angeordnet und das zeitliche Abklingen der Aktivität über 2 Stunden aufgezeichnet. Aus dieser Kurve soll dann die Halbwertszeit des Radonzerfalls ermittelt werden.

Untersuchung der Statistik des radioaktiven Zerfalls

Als Strahlungsquelle dient hier das Auernetz. Es sollen mindestens zwei Histogramme aufgenommen werden, die sich deutlich hinsichtlich der Größe ihres Mittelwertes unterscheiden, da für einen kleinen Mittelwert eine Poisson-Verteilung und für einen größeren Mittelwert eine Gaußverteilung nachgewiesen werden soll. Um die Größe des Mittelwertes einzustellen, kann der Abstand des Detektors zur Probe verändert werden.

Für alle anderen Experimente ist ein Zählrohr, das an einen elektronischen Zähler angeschlossen ist, zu nutzen. Zur Überprüfung des Absorptionsgesetzes und zur Untersuchung der Absorptionseigenschaften unterschiedlicher Materialien wird als Strahlungsquelle das Auernetz (Glühstrumpf) verwendet. Untersuchen Sie zuerst das exponentielle Absorptionsgesetz. Bringen Sie dazu Materialproben des gleichen Materials aber unterschiedlicher Dicke zwischen Strahlungsquelle und Detektor. Sie können dafür Papierblättchen (1 bis 20 Stück) oder Aluminiumbleche (gehaltert in Dia-Rahmen) unterschiedlicher Dicke verwenden. Untersuchen Sie anschließend das Absorptionsverhalten unterschiedlicher Materialien bei gleicher Dicke. Verwenden Sie dazu die vorhandenen 1 mm dicken Proben aus Aluminium, Pertinax, Kupfer, usw. Für die Überprüfung des Abstandsgesetzes (Uranglasknopf) müssen in einem Bereich von 1 bis etwa 5 cm Abstand ausreichend viele Messwerte aufgenommen werden. Vergessen Sie nicht, den Nulleffekt entsprechend zu berücksichtigen. Mit Hilfe eines Permanentmagneten, den man zwischen Uranglasknopf und Detektor positioniert, kann man feststellen, ob Strahlung vom Magneten abgelenkt wird.

Zur Ermittlung der Effizienz Ihres Detektors, wiegen Sie möglichst genau Ihre KCl-Probe ab und messen Sie die Aktivität Ihrer Probe.¹³ Da Ihr Detektor nur einen bestimmten Raumwinkel erfasst und die Siebkappe einen Teil dieser Strahlung zusätzlich absorbiert, wird nicht die gesamte, tatsächliche Strahlung gemessen.

¹² Anschließend muss der Draht wieder zur Spirale aufgewickelt werden. Dazu soll das am Versuchsplatz liegende Plastikrohr mit ca. 4 cm Durchmesser verwendet werden. Danach ist die Drahtspirale wieder an die Halterung zu hängen und die Hochspannung einzuschalten, damit auch die nächste Gruppe einen mit Staub- und Aerosolteilchen und Radonzerfallsprodukten behafteten Draht vorfindet.

¹³ Die KCl-Probe erhalten Sie, indem Sie eine Pappscheibe mit Klebeschicht in KCl drücken, wodurch eine dünne KCl-Schicht entsteht.

Aufgabenstellung

1. Messen Sie den Radonzerfall (Gruppenarbeit!) über eine Zeitdauer von etwa zwei Stunden. Nutzen Sie dazu das Zählrohr und das CASSY-Interface mit der GM-Box. Ermitteln Sie aus der aufgenommenen Kurve die Halbwertszeit des Radonzerfalls.¹⁴
2. Messen Sie die Statistiken des radioaktiven Zerfalls für einen kleinen Mittelwert (etwa 4 Impulse) und für einen größeren Mittelwert (etwa 20 Impulse). Nutzen Sie für die Messung das CASSY-Interface mit der GM-Box. Wählen Sie die CASSY-Einstellung „Histogramm“. Zeigen Sie durch Anpassungen, dass es sich im ersten Fall um eine Poisson-Verteilung und im zweiten Fall um eine Gauß-Verteilung handelt.
3. Überprüfen Sie das exponentielle Absorptionsgesetz mit einem Auernetz als Strahlungsquelle. Messen Sie dazu die Impulsraten, die auftreten, wenn unterschiedlich dicke Proben aus gleichem Material zwischen Strahlungsquelle und Detektor angeordnet werden.
4. Untersuchen Sie das Absorptionsverhalten von vier unterschiedlichen Materialien gleicher Stärke.
5. Überprüfen Sie das Abstandsgesetz. Nutzen Sie dazu als Strahlungsquelle den Uranglasknopf. Denken Sie bei allen Messungen daran, den Null-Effekt entsprechend zu berücksichtigen.
6. Weisen Sie mit Hilfe eines Magneten und eines entsprechend positionierten Detektors nach, dass es sich beim Uranglasknopf vorwiegend um β -Strahlung handelt.
7. Bestimmen Sie die Aktivität einer KCl-Probe und errechnen Sie daraus die Effizienz des Detektors. Überprüfen Sie anhand von geometrischen Überlegungen, ob die ermittelte Effizienz plausibel ist.

¹⁴ Der Mutter-Tochter Zerfall $\text{Pb } 214 \rightarrow \text{Bi } 214 \rightarrow \text{Po } 214$ mit Halbwertszeiten von 27 bzw. 20 min führt dazu, dass das nach Probennahme (Abwischen der Zerfallsprodukte vom Draht) vorhandene Gleichgewicht zwischen den Zerfallsprodukten $\text{Pb } 214$ (Konzentration N_1) und $\text{Bi } 214$ dahingehend verändert wird, dass die Konzentration N_2 von $\text{Bi } 214$ zuerst ansteigt. Mathematisch ausgedrückt heißt das entsprechend Gl. (1):

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t) \quad ; \quad N_1(t) = N_1(0) \cdot \exp(-\lambda_1 t)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_2(t)}{dt} &= -\lambda_2 N_2(t) + \lambda_1 N_1(t) \\ &= -\lambda_2 N_2(t) + \lambda_1 N_1(0) \cdot \exp(-\lambda_1 t) \end{aligned}$$

Diese DGL hat die Lösung:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] + N_2(0) \cdot \exp(-\lambda_2 t)$$

Die Zahl der Zerfälle ist dann proportional zur Zahl der instabilen Atome.

Bei einer Anpassung der Messkurven muss zusätzlich ein Untergrund von 0,5 Zerfällen/sec berücksichtigt werden, der durch den Zerfall von $\text{Po } 216$ in $\text{Pb } 212$ (Thoriumzerfallsreihe) mit HWZ von 10 h bedingt ist.