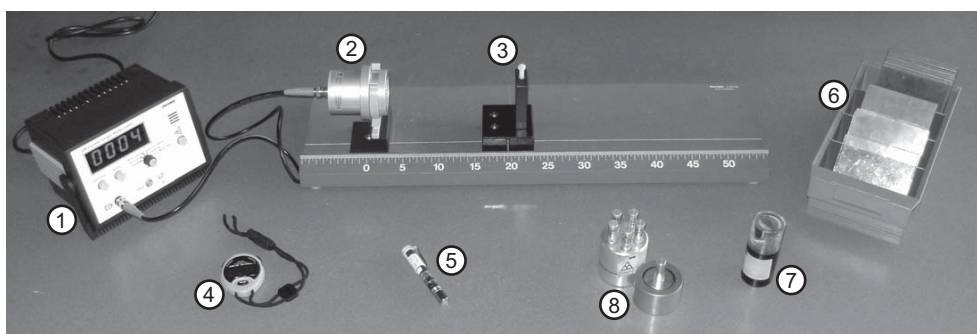


## 6 Radioaktivität

In diesem Versuch werden Sie einige grundlegende Begriffe zur Radioaktivität kennenlernen. Sie werden Strahlung mit einem Zählrohr nachweisen und sich mit Abstandsabhängigkeit, Absorption und Halbwertszeit beschäftigen. Dabei werden Sie auch mit einem Phänomen konfrontiert werden, das bei vielen anderen physikalischen Experimenten oder Messungen (praktisch) nicht in Erscheinung tritt, nämlich dass statistische Prozesse den Ausgang einer Messung völlig dominieren können.



- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| ① Betriebsgerät für Zählrohr       | ⑤ Stabdosisimeter  |
| ② Zählrohr                         | ⑥ Abschirmplatten (Kupfer verschiedene Dicken + Plexiglas)   |
| ③ Halter für radioaktive Präparate | ⑦ Isotopengenerator ( $^{238}\text{U}$ / $^{234}\text{Pa}$ ) |
| ④ Stoppuhr                         | ⑧ Radioaktive Präparate                                      |

### 6.1 Grundlagen

#### 6.1.1 Einleitung

Radioaktive Strahlung stellt seit jeher einen permanenten Umwelteinfluss dar, unter dem sich die Lebewesen auf der Erde entwickelt haben und dem auch gegenwärtig jedes Individuum ausgesetzt ist. Ursache dieser Strahlung sind Radionuklide, die in Gesteinen enthalten sind (terrestrische Strahlung), aber auch Strahlung, die aus dem Weltraum kommt (kosmische Strahlung).

Radioaktive Strahlung konnte erstmalig kurz vor Beginn des 20. Jahrhunderts (Becquerel 1896) nachgewiesen werden. Im Verlauf des 20. Jahrhunderts wurden dann durch Entdeckung der Kernspaltung und weiterer Kernreaktionen neue Radionuklide erzeugt. Insbesondere durch die Kernspaltung (bei Kernwaffen sowie in Kernreaktoren) wurde der Mensch erstmalig mit Radionukliden in konzentrierter Form und daher sehr großen Aktivitäten an radioaktiver Strahlung konfrontiert. Neben der Energietechnik spielen radioaktive Nuklide bzw. ionisierende Strahlung heutzutage auch eine sehr große Rolle in der Medizin (sowohl in der Diagnostik wie auch in der Strahlentherapie). Darüberhinaus gibt es weitere Anwendungen wie z.B. die Sterilisation von Produkten durch Strahlung. Der vorliegende Praktikumsversuch kann naturgemäß nur einige grundlegende Aspekte zu diesem weiten Gebiet behandeln. Um die Hintergründe und Resultate der Experimen-

te verstehen zu können, soll in den folgenden Kapiteln ein kurzer theoretischer Überblick gegeben werden.

### 6.1.2 Das Atom

Alle Stoffe, ob fest, flüssig oder gasförmig bestehen aus Atomen oder Molekülen. Jedes Atom besteht aus einem Kern und einer Hülle. Ein Element (z.B. Kohlenstoff; Symbol C) wird durch die Anzahl der einfach positiv geladenen Protonen im Kern charakterisiert. Diese Kernladungszahl entspricht der Ordnungszahl  $Z$  im Periodensystem der Elemente. In jedem Atomkern (mit Ausnahme von Wasserstoff  $^1\text{H}$ ) befinden sich zusätzlich noch elektrisch neutrale Teilchen, die Neutronen. Die Massenzahl  $A$  ergibt sich aus der Anzahl aller Nukleonen (Protonen + Neutronen) im Kern.

Atomkerne unterschiedlicher Massenzahl aber mit gleicher Ordnungszahl werden als Isotope oder isotope Nuklide bezeichnet. Jedes Element kommt in der Natur normalerweise als Gemisch verschiedener Isotope vor. In einer Nuklidkarte, wie sie auch im Praktikum aushängt, sind die verschiedenen Isotope mit ihren Kenndaten verzeichnet. Die übliche Schreibweise ist:



Dabei ist:  $A$  Massenzahl,  $Z$  Kernladungszahl, X Elementsymbol

So sind zum Beispiel zwei der Isotope des Elements Kohlenstoff:  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_6\text{C}$ .

### 6.1.3 Kernzerfälle und Strahlungsarten

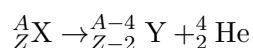
Unter Radioaktivität versteht man die Eigenschaft bestimmter Kernarten (Radionuklide), sich unter Aussenden von Strahlung spontan umzuwandeln. Dieser Vorgang ist nicht durch äußere Einwirkungen beeinflussbar. Man bezeichnet ihn als radioaktiven Zerfall.

Wir geben im Folgenden auch die Energie der ausgesandten Teilchen an. Es ist üblich dabei die Einheit "Elektronenvolt" (eV) (bzw.  $10^3 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$  bzw.  $10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$ ) zu verwenden. Ein Elektronenvolt (1 eV) ist die kinetische Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen der elektrischen Potentialdifferenz 1 Volt gewinnt.

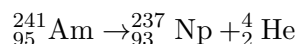
#### Alpha-Strahlung

$\alpha$ -Zerfall tritt bevorzugt bei Kernen mit hoher Massenzahl ( $A > 200$ ) auf. Die  $\alpha$ -Strahlung ist eine Teilchenstrahlung, bestehend aus Heliumkernen ( $A = 4$ ,  $Z = 2$ ) großer Geschwindigkeit. Typischerweise liegt die Energie der  $\alpha$ -Teilchen zwischen 4 MeV und 9 MeV. Das entspricht einer Geschwindigkeit von  $14 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  bis  $20 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ . Die Reichweite in Luft beträgt ca. 3 bis 8 cm. Aufgrund ihrer positiven Ladung sind sie durch elektrische und magnetische Felder ablenkbar.

Die Zerfallsgleichung lautet:



Zum Beispiel zerfällt das Americium-Isotop  ${}^{241}\text{Am}$  mit einer Halbwertszeit von 432 a:

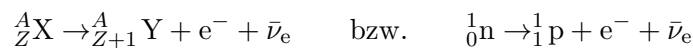


### Beta<sup>-</sup>-Strahlung

Sie tritt auf bei Kernen mit relativem Neutronenüberschuss. Sie besteht aus Elektronen ohne einheitliche Geschwindigkeiten (bis 0,999 c) und Energien. Das Elektron entsteht aus der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton. Der durch den Zerfall entstehende Tochterkern ist energetisch stärker gebunden und daher stabiler (d.h. größere Lebensdauer bzw. stabil). Zusätzlich zum Elektron wird noch ein Elektron-Antineutrino frei. Dieses besitzt nur eine sehr kleine Ruhemasse und keine Ladung, es nimmt jedoch einen Teil der Zerfallsenergie auf.

Die Reichweite in Luft liegt für  $\beta^-$ -Strahlung zwischen 1,5 m (0,5 MeV) und 8,5 m (2 MeV). Wegen ihrer negativen Ladung werden die  $\beta^-$ -Teilchen im elektrischen und magnetischen Feld entgegengesetzt zu den  $\alpha$ -Teilchen abgelenkt.

Die Zerfallsgleichung lautet:

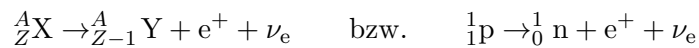


Am Beispiel Strontium  ${}^{90}\text{Sr}$  (Halbwertszeit: 29 a):  ${}^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + e^- + \bar{\nu}_e$

### Beta<sup>+</sup>-Strahlung und Elektroneneinfang

Sie tritt bei Kernen mit geringer relativer Neutronenzahl auf. Der Atomkern emittiert ein Positron, das Antiteilchen des Elektrons. Es entsteht bei der Umwandlung eines Protons in ein Neutron. Gleichzeitig wird wieder ein Elektron-Neutrino ausgesandt. Die Eigenschaften entsprechen (bis auf kleine Unterschiede) genau denen der  $\beta^-$ -Strahlung, außer dass das Teilchen positiv geladen ist. Trifft das Positron nach Abbremsung in Materie auf ein Elektron, so vernichten sich Teilchen und Antiteilchen unter Aussendung von zwei  $\gamma$ -Quanten.

Die Zerfallsgleichung zum  $\beta^+$ -Zerfall lautet:



Ein Beispiel ist das Natriumisotop  ${}^{22}\text{Na}$  (Halbwertszeit: 2,6 a):  ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu_e$

Ein Atomkern kann überschüssige positive Ladung auch loswerden, indem er ein Elektron aufnimmt. Diese Zerfallsart nennt man im Allgemeinen Elektronen- oder K-Einfang. Sie stellt eine dem  $\beta^+$ -Zerfall äquivalente Kernumwandlung dar:  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

Das Elektron stammt meistens aus der dem Kern nächsten Elektronen-Schale (K-Schale) oder auch aus der L-Schale. Durch den Einfang des Elektrons entsteht in der Schale eine Lücke, die durch nachrückende Elektronen aufgefüllt wird. Diese geben beim "Herabfallen" aus einer höheren Schale ein für das jeweilige Element charakteristisches Röntgenquant ab.

### Gamma-Strahlung

$\gamma$ -Strahlung wird immer dann ausgesandt, wenn ein angeregter Kern von einem Zustand höherer in einen Zustand niedrigerer Energie übergeht. Angeregte Kernzustände entstehen zum Beispiel in einem Tochterkern nach einem  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall.  $\gamma$ -Strahlung ist somit in den allermeisten Fällen eine Begleiterscheinung bei  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfällen. Wie Licht oder Röntgenstrahlung ist  $\gamma$ -Strahlung von elektromagnetischer Natur. Typische Wellenlängen sind  $< 10^{-12}$  m, d.h. die Energien sind oft  $> 80$  keV. Ihre Reichweite in Luft ist erheblich größer als bei  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlung. Sie ist elektrisch neutral und deshalb (im Vergleich zu  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen) im elektrischen und magnetischen Feld nicht ablenkbar.

## Spaltungsreaktionen

Bei Kernen mit sehr großer Massenzahl kann es zu einer spontanen Spaltung (s.f., engl.: spontaneous fission) kommen. Hierbei zerfällt der Kern in zwei Nuklide mittlerer Größe und mehrere freie Neutronen. Dabei ist zu beachten, dass die meisten Spaltprodukte radioaktiv sind. Eine Kernspaltung kann auch durch Beschuss von außen (z.B. mit Neutronen) induziert werden. Durch Einfang eines Neutrons im Kern wird dieser instabil und zerfällt. Da beim Zerfall wieder Neutronen frei werden, kann durch geschickte Anordnungen eine stabile Kettenreaktion erreicht werden (Kernreaktor, Atombombe). Am Beispiel des Uranisotops  $^{235}\text{U}$  (Halbwertszeit:  $7,0 \cdot 10^8$  a):



Außerdem können sich noch viele andere Paare an Spalt-Nukliden bilden.

### 6.1.4 Zerfallsgesetz, Halbwertszeit, Aktivität

Zu welchem Zeitpunkt ein bestimmter instabiler Kern zerfällt lässt sich nicht vorhersagen. Es sind nur Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Zerfalls möglich. Ein Maß für die Zerfallswahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit ist die *Zerfallskonstante*  $\lambda$ , die für jedes Radionuklid einen charakteristischen Wert besitzt. Die Zahl  $dN$  der pro Zeitintervall  $dt$  zerfallenden Kerne ist proportional zur Zerfallskonstante  $\lambda$  und zur Anzahl der vorhandenen Kerne  $N$ :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N. \quad (6.1)$$

Da die Zahl der Kerne ja abnimmt ( $dN < 0$ ), erscheint hier ein negatives Vorzeichen. Da die Zerfallskonstante unabhängig von der Zeit  $t$  ist<sup>1</sup>, erhält man durch einfache Integration obiger Gleichung das Zerfallsgesetz:

$$N(t) = N(0) \cdot \exp(-\lambda t) \quad \text{Zerfallsgesetz} \quad (6.2)$$

$N(0)$  ist die zur Zeit 0 (also zu Beginn) vorhandene Anzahl radioaktiver Kerne.  $N(t)$  ist die zur Zeit  $t$  noch vorhandene Anzahl radioaktiver Kerne.

Anschaulicher als die Zerfallskonstante  $\lambda$  ist die *Halbwertszeit*  $T_{1/2}$ . Sie gibt an, in welcher Zeit eine ursprünglich vorhandene Anzahl Kerne durch Zerfall auf die Hälfte abgenommen hat. Setzt man diese Bedingung in die Zerfallsgleichung ein, ergibt sich damit für die Halbwertszeit  $T_{1/2}$ :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (6.3)$$

Als *Aktivität*  $A(t)$  bezeichnet man die Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit. Sie wird in *Becquerel* (Bq) (= ein Zerfall pro Sekunde) angegeben. Dabei spielt die Art des Zerfalls keine Rolle ( $\alpha$ -,  $\beta$ - oder  $\gamma$ -Strahlung), lediglich die Anzahl ist wichtig. Aus obigen Gleichungen ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N(0) \cdot \exp(-\lambda t) = A(0) \cdot \exp(-\lambda t) \quad (6.4)$$

Für die Aktivität gilt also ebenfalls das exponentielle Zerfallsgesetz, genauso wie für die Zahl der radioaktiven Atome selbst. Die Aktivität ist bei gleicher Anzahl von Ausgangs-Atomen um so größer, je größer  $\lambda$  bzw. je kleiner  $T_{1/2}$  des Nuklids ist.

<sup>1</sup>Die Zeitunabhängigkeit von  $\lambda$  impliziert, dass sich die Wahrscheinlichkeitsverhältnisse des Zerfalls nicht ändern. Ein instabiler Kern hat sozusagen keine innere Uhr, die z.B. anzeigen würde, dass sein Zerfall schon längst "überfällig" wäre.

### 6.1.5 Zählstatistik beim radioaktiven Zerfall

Wie zu Beginn des vorigen Kapitels bereits dargestellt ist für den Zerfall des einzelnen Kerns nur eine Wahrscheinlichkeitsaussage möglich. Insofern macht die Gleichung 6.4 nur eine Aussage über den Mittelwert der Aktivität. Beim Nachweis von Strahlung, das heißt Zählung von Strahlungsereignissen, wird man diesen Mittelwert aber nur dann erhalten (mit vernachlässigbarer Streuung; vergleiche dazu die Betrachtung zur relativen Streuung am Kapitelende), wenn man während der Messdauer sehr viele Ereignisse beobachtet, das heißt wenn die Aktivität sehr hoch und / oder die Messdauer sehr lang ist.

Oftmals ist diese Voraussetzung in der Praxis (und auch bei diesem Versuch) aber nicht erfüllt. Hier macht man stattdessen folgende Beobachtung: Zählt man mit einem Detektor während einer Zeitdauer  $\Delta t$  Strahlungsereignisse, so erhält man eine Anzahl  $n_1$  Ereignisse. Wiederholt man diese Messung mehrmals mit jeweils derselben Dauer  $\Delta t$ , so werden sich lauter unterschiedliche Ereignisanzahlen  $n_2, n_3, \dots$  ergeben, obwohl die "globalen" Randbedingungen der Messung gleich bleiben. (Voraussetzung für gleiche Randbedingungen ist lediglich, dass die Halbwertszeit des untersuchten Nuklids groß gegenüber der Beobachtungsdauer ist. Bei Halbwertsdauern von mehreren Jahren ist dies sicher der Fall.) Ursache dieser Beobachtung ist natürlich der Zufallscharakter des einzelnen Zerfalls. Dies führt dazu, dass der Ausgang jeder Messung (der Zeitdauer  $\Delta t$ ) rein statistischer Natur ist.<sup>2</sup> Trotzdem ist es natürlich möglich, eine Wahrscheinlichkeitsaussage darüber zu treffen, wieviele Zerfälle während der Messzeit  $\Delta t$  auftreten werden. Zur Beschreibung dieser Art von Zählexperimenten eignet sich die sogenannte Poisson-Verteilung:

$$P_{\bar{n}}(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} \cdot \exp(-\bar{n}) \quad (6.5)$$

$P_{\bar{n}}(n)$  gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, innerhalb einer festgelegten Messdauer eine Anzahl von  $n$  Zerfällen zu messen, wenn der entsprechende Mittelwert/Erwartungswert  $\bar{n}$  ist (für die gleiche Messdauer). Beachten Sie, dass durch die Angabe des Erwartungswerts  $\bar{n}$  die Poisson-Verteilung bereits eindeutig bestimmt ist! Während  $n$  eine ganze Zahl ist (es gibt ja nur ganze Zählereignisse), wird  $\bar{n}$  in der Regel nicht ganzzahlig sein.  $\bar{n}$  kann dabei als Mittelwert aus einer Vielzahl von Messungen oder auch direkt aus einer Messung (von größerer Zeitdauer) ermittelt werden.

Eine weitere Eigenschaft der Poisson-Verteilung ist, dass der Erwartungswert  $\bar{n}$  zugleich auch die Varianz der Verteilung  $\sigma^2$  ist. Für die Standardabweichung  $\sigma$  folgt somit:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\bar{n}} \quad (6.6)$$

Die Standardabweichung  $\sigma$  ist ein Maß für die Streuung  $\Delta n$  der Messwerte  $n$  um den Mittelwert  $\bar{n}$ . Also gilt:

$$\Delta n = \sqrt{\bar{n}} \quad (6.7)$$

Wenn man also zum Beispiel eine mittlere Zahl von 100 Ereignissen misst, so beträgt die Streuung  $\Delta n = 10$  Ereignisse. Das heißt bei wiederholten Messungen werden sich die Ereigniszahlen überwiegend in einem Bereich zwischen ca. 90 und 110 Ereignissen befinden.<sup>3</sup> Trotzdem können bei einzelnen Messungen natürlich auch (deutlich) geringere

<sup>2</sup>Diese Art der Beobachtung ist einem in vielen anderen Bereichen der Physik bzw. Messtechnik ja eher fremd. Wenn man z.B. mit einem Spannungsmessgerät mehrmals nacheinander die Spannung derselben Batterie misst, so erwartet man lauter "gleiche" Messwerte.

<sup>3</sup>Für hinreichend große Erwartungswerte ( $\bar{n} > 10$ ) kann die Poisson-Verteilung durch die Normalverteilung genähert werden. Dann beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass die gemessene Anzahl von Ereignissen im Intervall  $\bar{n} - \Delta n$  bis  $\bar{n} + \Delta n$  liegt, 68,3%.

oder auch größere Anzahlen auftreten, jedoch mit abnehmender Wahrscheinlichkeit, je weiter der Messwert vom Mittelwert entfernt ist.

Eine andere wichtige Größe ist die relative Streuung:

$$\frac{\Delta n}{\bar{n}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}} \quad (6.8)$$

Man erkennt, dass diese mit wachsender mittlerer Anzahl  $\bar{n}$  immer kleiner wird. In der Praxis kann dies bedeuten, dass man oftmals sehr lange messen muss, bis man hinreichend große Ereigniszahlen und damit eine kleine, relative statistische Abweichung erreicht.

### 6.1.6 Abstandsabhängigkeit der Strahlungsintensität

Radioaktive Strahlung wird isotrop, das heißt gleichmäßig in alle Richtungen emittiert. Befindet man sich im Abstand  $r$  zur Quelle, so verteilen sich die ausgestrahlten Teilchen bzw. Strahlungsquanten auf eine gedachte Kugeloberfläche mit dem Radius  $r$  und der Quelle als Kugelmittelpunkt. Diese Kugeloberfläche wächst mit dem Quadrat des Abstands gemäß  $F_{\text{Kugel}} = 4\pi r^2$ . Daher nimmt die Strahlungsintensität, also die Anzahl der Strahlungsteilchen/-quanten, die (im statistischen Mittel) pro Zeiteinheit auf eine Flächeneinheit treffen, mit dem Quadrat des Abstands ab.<sup>4</sup>

Verwendet man zur Strahlungsmessung einen Detektor mit einer aktiven Fläche  $F_{\text{Detektor}}$ , so wird dieser im Abstand  $r$  zur (punktförmigen) Quelle mit der Aktivität  $A_{\text{Quelle}}$  eine Zählrate  $\dot{n}$  (Anzahl von registrierten Ereignissen pro Zeiteinheit) anzeigen:

$$\dot{n} = A_{\text{Quelle}} \cdot \epsilon \cdot \frac{F_{\text{Detektor}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (6.9)$$

Nicht alle Strahlungsteilchen, die den Detektor treffen, werden von diesem auch nachgewiesen (insbesondere nicht bei  $\gamma$ -Strahlung, siehe Kapitel 6.1.7). Die Nachweiseffizienz des Detektors wird also in der Regel geringer als 100% sein. In der Beziehung 6.9 ist dies durch einen Faktor  $\epsilon$  berücksichtigt.

Obige Formel gilt nur in guter Näherung, wenn die Ausdehnung des Detektors  $F_{\text{Detektor}}$  klein verglichen mit der Kugeloberfläche  $F_{\text{Kugel}} = 4\pi r^2$  ist. Dies bedeutet, der Abstand  $r$  muss groß gegenüber der Abmessung des Detektors sein. Ebenfalls nicht in 6.9 berücksichtigt ist eine eventuelle Absorption der Strahlung auf dem Weg von der Quelle zum Detektor.

### 6.1.7 Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie

Beim Durchgang durch Materie tritt die Strahlung in Wechselwirkung mit dieser, insbesondere mit der Elektronenhülle der Atome, die dabei angeregt oder ionisiert werden kann. Im Falle der Ionisation entstehen positiv geladene Teilchen (Ionen) und negativ geladene Teilchen (Elektronen). Die freigesetzten Elektronen besitzen zum Teil genügend Energie, um weitere Ionisationen zu bewirken.

Die Wechselwirkung geladener Teilchen ( $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen) mit Materie ist relativ stark. Durch Stöße mit den Hüllenelektronen (aufgrund von elektrostatischen Anziehungs- bzw. Abstoßungskräften) werden sie auf relativ kurzen Distanzen bis zum Stillstand abgebremst. Daher ist ihre Reichweite bzw. ihr Durchdringungsvermögen gering.  $\alpha$ -Strahlen lassen sich schon von einem Blatt Papier abschirmen.  $\beta$ -Strahlen haben ein größeres

<sup>4</sup>Diese quadratische Abnahme mit dem Abstand gilt für jede Art von Strahlung/Leistung, die isotrop emittiert wird, also zum Beispiel auch für das Licht einer Glühlampe oder für die Schallintensität einer Hupe.

Durchdringungsvermögen als  $\alpha$ -Strahlen, sind jedoch durch wenige Millimeter Aluminium oder Plexiglas schon weitgehend abzuschirmen.

$\gamma$ -Strahlung besteht nicht aus klassischen Teilchen (wie  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchen), sondern aus elektromagnetischen Strahlungsquanten (Photonen), die selbst elektrisch neutral sind. Die Wechselwirkung von  $\gamma$ -Strahlung mit der Materie läuft daher auf andere Weise ab, nämlich durch punktuelle Einzelprozesse, die mit gewisser Wahrscheinlichkeit auftreten können. Alle diese Prozesse führen zur Erzeugung von freien, mehr oder weniger hochenergetischen Elektronen:

Beim *Photoeffekt* wird die gesamte Energie des einfallenden  $\gamma$ -Quants (Photon) vom Atom absorbiert und auf ein in der Hülle des Atoms gebundenes Elektron übertragen. Das Elektron wird dadurch aus der Bindung der Atomhülle gelöst. Es entsteht ein freies Elektron und ein Ion. Dieser Effekt überwiegt bei  $\gamma$ -Quantenenergien unter 0,5 MeV.

Beim *Comptoneffekt* wird, ähnlich wie beim Photoeffekt, ein Elektron aus der Atomhülle freigesetzt. Es wird hierbei jedoch nicht die gesamte Energie des einfallenden  $\gamma$ -Quants an das Elektron übertragen und das  $\gamma$ -Quant absorbiert, sondern nur ein Teil davon. Der andere Teil verbleibt in einem energieärmeren und um einen bestimmten Winkel gestreuten  $\gamma$ -Quant.

Beträgt die  $\gamma$ -Energie mindestens 1,02 MeV (= doppelte Ruheenergie des Elektrons) kann es im Feld des Atomkerns in ein Elektron und ein Positron umgewandelt werden (gemäß der Einsteinschen Beziehung zwischen Energie und Masse). Dieser Prozess wird als *Paarbildungseffekt* bezeichnet. Das Positron wird in einer Paarvernichtung wieder in elektromagnetische Strahlung verwandelt.

Bild 6.1 zeigt eine schematische Darstellung der  $\gamma$ -Wechselwirkungsprozesse. Die Energieskala am Rand deutet den Energiebereich an, in dem der jeweilige Prozess am häufigsten stattfindet.

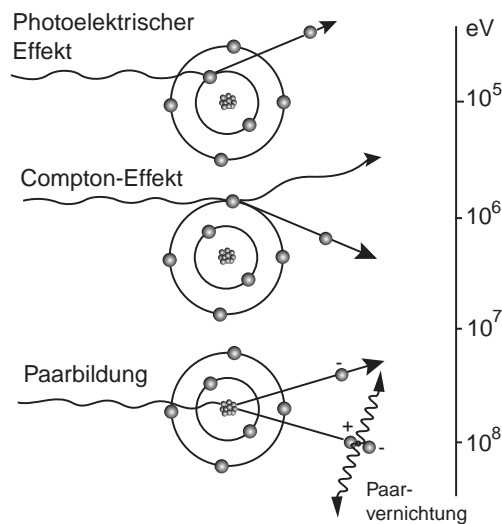


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der  $\gamma$ -Strahlenwechselwirkungsprozesse.

Die Abschirmung von  $\gamma$ -Strahlen ist im Vergleich zu  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen verhältnismäßig schwierig. Häufig verwendet man hierzu Blei (Atome mit hoher Kernladung  $Z$  haben eine höhere Wechselwirkungswahrscheinlichkeit).

Bei allen beschriebenen Wechselwirkungen entstehen also freie Elektronen. Der Nachweis dieser Elektronen kann daher zum Nachweis der ionisierenden Strahlung verwendet werden.

### 6.1.8 Schwächung von $\gamma$ -Strahlung in Materie

Trotz größerer Durchdringungsfähigkeit als die anderen Strahlenarten kann auch  $\gamma$ -Strahlung beim Durchgang durch Materie geschwächt werden. Die Rate  $\dot{n}$  noch nachzuweisender Quanten hinter einer Materieschicht der Dicke  $x$  ist daher geringer. Es gilt:

$$\dot{n}(x) = \dot{n}(0) \cdot \exp(-\mu x) \quad (6.10)$$

Dabei ist  $\dot{n}(x)$  die Zählrate nach Durchqueren einer Materieschicht der Dicke  $x$  und  $\dot{n}(0)$  die Zählrate vor Durchqueren einer Materieschicht.

$\mu$  heißt Schwächungskoeffizient (bzw. auch totaler Absorptionskoeffizient). Seine Dimension ist Länge<sup>-1</sup> (Einheit cm<sup>-1</sup> bzw. m<sup>-1</sup>). Der Schwächungskoeffizient ist abhängig vom Absorbermaterial und von der Energie der Strahlen.

Tabelle 6.1: Schwächungskoeffizienten  $\mu$  (cm<sup>-1</sup>) für  $\gamma$ -Strahlung der Energie  $E_\gamma$  (MeV)

$E_\gamma$	$\mu_{\text{Luft}}$	$\mu_{\text{Plexiglas}}$	$\mu_{\text{Aluminium}}$	$\mu_{\text{Kupfer}}$	$\mu_{\text{Blei}}$
0,010	$6,17 \cdot 10^{-3}$	3,99	$7,08 \cdot 10^1$	$1,93 \cdot 10^3$	$1,48 \cdot 10^3$
0,020	$9,37 \cdot 10^{-4}$	$6,80 \cdot 10^{-1}$	9,29	$3,03 \cdot 10^2$	$9,80 \cdot 10^2$
0,030	$4,26 \cdot 10^{-4}$	$3,61 \cdot 10^{-1}$	3,04	$9,78 \cdot 10^1$	$3,44 \cdot 10^2$
0,040	$2,99 \cdot 10^{-4}$	$2,80 \cdot 10^{-1}$	1,53	$4,36 \cdot 10^1$	$1,63 \cdot 10^2$
0,050	$2,51 \cdot 10^{-4}$	$2,47 \cdot 10^{-1}$	$9,94 \cdot 10^{-1}$	$2,34 \cdot 10^1$	$9,13 \cdot 10^1$
0,060	$2,26 \cdot 10^{-4}$	$2,29 \cdot 10^{-1}$	$7,50 \cdot 10^{-1}$	$1,43 \cdot 10^1$	$5,70 \cdot 10^1$
0,100	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$1,95 \cdot 10^{-1}$	$4,60 \cdot 10^{-1}$	4,11	$6,30 \cdot 10^1$
0,200	$1,49 \cdot 10^{-4}$	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$3,30 \cdot 10^{-1}$	1,40	$1,13 \cdot 10^1$
0,300	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-1}$	$2,81 \cdot 10^{-1}$	1,00	4,58
0,400	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-1}$	$2,50 \cdot 10^{-1}$	$8,43 \cdot 10^{-1}$	2,64
0,500	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-1}$	$2,28 \cdot 10^{-1}$	$7,49 \cdot 10^{-1}$	1,83
0,600	$9,71 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$2,11 \cdot 10^{-1}$	$6,83 \cdot 10^{-1}$	1,42
1,000	$7,66 \cdot 10^{-5}$	$8,18 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-1}$	$5,29 \cdot 10^{-1}$	$8,06 \cdot 10^{-1}$
1,500	$6,24 \cdot 10^{-5}$	$6,65 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-1}$	$4,30 \cdot 10^{-1}$	$5,93 \cdot 10^{-1}$
2,000	$5,36 \cdot 10^{-5}$	$5,71 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-1}$	$3,77 \cdot 10^{-1}$	$5,23 \cdot 10^{-1}$
3,000	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$4,57 \cdot 10^{-2}$	$9,56 \cdot 10^{-2}$	$3,22 \cdot 10^{-1}$	$4,81 \cdot 10^{-1}$

Ein immer wieder gebrauchter Begriff ist die sog. Halbwertsdicke bzw. Halbwertsschicht  $x_{1/2}$ . Analog zur Halbwertszeit versteht man darunter die Dicke einer absorbierenden Schicht, durch welche die Strahlung auf die Hälfte vermindert wird. Es gilt:

$$\dot{N}(x_{1/2}) = \frac{\dot{N}(0)}{2} = \dot{N}(0) \cdot \exp(-\mu \cdot x_{1/2}) \quad (6.11)$$

Daraus folgt für die Halbwertsdicke:

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (6.12)$$

### 6.1.9 Nachweis ionisierender Strahlung mit einem Zählrohr

Da der Mensch kein Sinnesorgan für radioaktive Strahlung besitzt, muss er sich beim Nachweis dieser Strahlung voll auf technisch-physikalische Nachweisprinzipien bzw. Strahlungsdetektoren verlassen. Prinzipiell ist die genaue Charakterisierung eines Strahlungsfelds (Welche Art von Strahlung? Welche Strahlungsenergie?) ein schwieriges Problem,



das nur mit aufwändigen Messapparaturen zu lösen ist. Oftmals ist eine genaue Charakterisierung jedoch gar nicht notwendig und man kann auf einfache Messprinzipien zurückgreifen. In diesem Praktikumsversuch soll ein sogenanntes Zählrohr verwendet werden. Hierbei handelt es sich um ein relativ robustes Nachweisgerät, das auch historisch eines der ersten Strahlungsmessgeräte war. Trotzdem ist es heute noch, zum Beispiel für Anwendungen im Strahlenschutz, eines der meistverwendeten Messprinzipien.

Das Zählrohr besteht aus einem mit Zählgas gefüllten Metallzylinder und einem entlang der Zylinderachse verlaufenden Metalldraht. Soll mit dem Zählrohr neben  $\gamma$ -Strahlung auch  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung nachgewiesen werden, so ist in der Regel eine der Stirnseiten des Zählrohrs nur mit einer dünnen Folie aus Kunststoff oder Glimmer verschlossen. Auch das Praktikumszählrohr weist diese Bauart auf, wobei als mechanischer Schutz ein Gitter vor der Folie angebracht ist. Der Zylinder wird als Kathode, der Draht als Anode geschaltet. Dringt nun ein geladenes Teilchen bzw. ein  $\gamma$ -Quant in das Zählervolumen ein, so wird ein Teil der Atome bzw. Moleküle des Zählgases ionisiert. Die freigesetzten Ladungsträger werden von den entsprechenden Polen angezogen. Man unterscheidet drei Arten, in denen das Zählrohr betrieben werden kann:

1. Bei kleiner Spannung  $U$  werden nur die vom durchtretenden Strahlungs-Teilchen primär erzeugten Ladungsträger (Elektronen) am Anodendraht registriert. Eine Verstärkung findet nicht statt. Am Signalausgang erhält man dementsprechend eine sehr kleine elektrische Stromstärke. Dies ist die Funktionsweise einer sog. *Ionisationskammer*.
2. Bei höherer Spannung ist die elektrische Feldstärke in der Nähe des Drahtes ausreichend, um die primär gebildeten Elektronen auf so große Geschwindigkeiten zu beschleunigen, dass sie durch weitere Stöße neutrale Gasatome ionisieren. Man bezeichnet diesen Mechanismus als *Gasverstärkung*. Bei nicht zu hoher Spannung ist das Ausgangssignal aber immer noch proportional zur Zahl der Primärelektronen und damit zur Energiedeposition durch die Strahlung. Wir sprechen deshalb von *Proportionalzählrohren*.
3. Bei weiterer Steigerung der angelegten Spannung wird die Gasverstärkung schließlich durch Sättigungseffekte begrenzt. Wir können uns vorstellen, dass sich die Ionisation über das ganze Zählrohr ausbreitet, wodurch die gesamte sekundäre Ladungsmenge (und damit das Ausgangssignal) unabhängig von der Primäriodisation wird. Es kann dann keine Aussage mehr über die im Zählgas primär deponierte Strahlungsenergie gemacht werden. Das Zählrohr arbeitet dann im *Auslösebereich*. Das Auslösezählrohr heißt auch *Geiger-Müller-Zählrohr*. Bei Aufnahme einer Kennlinie (Zählrate über Spannung) ist der Auslösebereich dadurch charakterisiert, dass die Zählrate trotz Spannungserhöhung konstant bleibt (Plateaubereich der Kennlinie).

Eine zu hohe Spannung kann zu einer Glimmentladung führen, die das Zählrohr zerstören kann.

In diesem Praktikum werden Zählrohre verwendet, die im Auslösebereich betrieben werden sollen. Sie erlauben lediglich eine Zählung von Strahlungsereignissen, das heißt es wird nur die Anzahl der eintreffenden (und wechselwirkenden!) Teilchen registriert, nicht aber deren Energie(verlust) oder Ladung.

## 6.2 Versuchsaufbau

### 6.2.1 Zählrohr und Betriebsgerät

Das Zählrohr ist an ein Betriebsgerät angeschlossen, das sowohl die Hochspannung für das Zählrohr (in unserem Fall 500 V) bereitstellt wie auch die Strahlungsereignisse zählt. Es können verschiedene Messzeiten voreingestellt werden, außerdem kann ein Lautsprecher zugeschaltet werden, der bei jedem registrierten Ereignis ein "Knacken" von sich gibt.

### 6.2.2 Radioaktive Präparate

Im Praktikum sind folgende radioaktive Präparate vorhanden (es wird nur ein Teil davon verwendet):

Präparat	Strahlungsart	Energie (MeV)	Aktivität (kBq)	Halbwertszeit
Am-241	$\alpha$	5,486	74	432 a
	$\gamma$	0,060		
Co-60	$\beta^-$	0,318	74	5,27 a
	$\gamma$	1,173 / 1,332		
Cs-137	$\beta^-$	0,514	37	30 a
	$\gamma$	0,662		
Na-22	$\beta^+$	0,546	74	2,6 a
	$\gamma$	1,275 / 0,511		
Sr-90	$\beta^-$	0,546 / 2,280	74	28,6 a
Pa-234	$\beta^-$	2,269		1,16 min

Tabelle 6.2: Strahlenquellen im Praktikum (alle Strahlenquellen sind umschlossen!). **Die angegebenen Aktivitäten beziehen sich auf die Ursprungswerte im Jahr 1997 (Herstellungsjahr der Quellen).** Die angegebenen  $\beta^-$ -Energien sind die jeweiligen Maximalenergien.

## 6.3 Hinweise zum Strahlenschutz

Obwohl von den verwendeten radioaktiven Präparaten bei sachgemäßem Umgang keine Gefahr ausgeht (siehe Abschätzung in Kapitel 6.5.3), unterliegt dieser Praktikumsversuch doch gewissen Regularien. So wird Sie der Betreuer vor Versuchsbeginn kurz über die wichtigsten Verhaltensregeln belehren, deren Kenntnisnahme Sie durch Unterschrift in der Teilnehmerliste bestätigen müssen. Die wichtigsten Regeln seien auch hier nochmal aufgeführt:

- Am Praktikumsplatz nicht essen oder trinken.
- Nicht benötigte radioaktive Präparate in die Aufbewahrungsbehälter beim Quellen-Schrank stecken.
- Radioaktive Präparate immer nur am nicht-aktiven Ende anfassen.
- Vermeiden Sie kleine Abstände der Präparate zu Ihrem Körper und zu denen Ihrer Kollegen.

- Sollten Sie den Verdacht haben, ein radioaktives Präparat könnte beschädigt sein, geben Sie bitte sofort dem Betreuer Bescheid.
- Schwangere Frauen müssen/sollen am Versuch nicht teilnehmen.

#### **Verwendung der Stabdosimeter:**

Stellvertretend für die Gruppe sollte (mindestens) ein Praktikums Teilnehmer seine Strahlenbelastung während des Versuchs mit einem Stabdosimeter aufzeichnen.

Stabdosimeter vor Versuchsbeginn ablesen, den angezeigten Wert notieren. Die Dosimeter müssen während der gesamten Versuchszeit am Körper getragen und dürfen nicht absichtlich in die Nähe der Strahlenquellen gebracht werden. Nach dem Versuch den neuen Wert ablesen und die Differenz zum Ausgangswert bilden.

Bitte nicht vergessen, das Dosimeter wieder abzugeben!

## **6.4 Messaufgaben und Versuchsdurchführung**

### **6.4.1 Untergrundmessung und Zählstatistik**

In dieser ersten Messaufgabe werden noch keine radioaktiven Quellen benötigt. Um die Untergrundmessungen nicht zu beeinflussen sollen sich deshalb auch noch keine Quellen auf den Arbeitstischen befinden.

#### **Aufgabenstellung**

1. Untersuchen Sie in einer Messreihe die Zählstatistik und fertigen Sie ein Histogramm an. Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Poisson-Verteilung.
2. Wie viele Strahlungsereignisse zählt das Zählrohr im Mittel pro 10 Sekunden wenn sich keine radioaktiven Präparate vor dem Zählrohr befinden (Nulleffekt, Untergrundzählrate)?

**Versuchsdurchführung** Schalten Sie das Betriebsgerät ein und stellen Sie den Wahlschalter auf “unendliche” Messdauer. Starten Sie nun die Messung und schalten Sie den Lautsprecher ein. Sie können nun beobachten, wie das Zählrohr in unregelmäßigen Zeitabständen Ereignisse detektiert und das Betriebsgerät die Ereignisse zählt. Sie sollten dabei einen ersten Eindruck davon bekommen, wie sich ein vom Zufall dominiertes Zähl experiment verhält (es gibt zum Teil erstaunlich lange Pausen zwischen zwei Ereignissen, andererseits treten Ereignisse aber auch gehäuft auf).

Dieses Verhalten wollen wir nun genauer untersuchen. Setzen Sie den Zähler auf Null und starten Sie ihn erneut. Notieren Sie 5 Minuten lang alle 10 s (Stoppuhr) den am Zähler angezeigten Wert. Ermitteln Sie daraus die Zahl der Ereignisse, die Sie jeweils in den 10s-Intervallen gemessen haben. Auf diese Weise sollten Sie 30 Werte (für  $n$ ) erhalten. Ermitteln Sie nun, wie häufig welcher Wert vorkommt, also wie oft haben Sie in 10s gar kein Ereignis beobachtet, wie oft haben Sie genau ein Ereignis beobachtet, wie oft ...

Erstellen Sie nun mit diesen Daten ein Histogramm, das heißt die entsprechende Häufigkeit wird über den Ereignisanzahlen  $n$  aufgetragen.

Die so experimentell bestimmte Verteilung soll nun mit den Vorhersagen der Poisson-Verteilung verglichen werden. Dazu wird der entsprechende Mittelwert  $\bar{n}$  benötigt. Diesen erhalten Sie ganz einfach dadurch, dass Sie die Gesamtzahl aller Ereignisse (also den

Wert, den Sie nach 5 min vom Zählgerät ablesen) durch die Zahl der Messintervalle (also 30) dividieren. Berechnen Sie nun gemäß der Poisson-Verteilung die Werte<sup>5</sup>

$$30 \cdot P_{\bar{n}}(n) = 30 \cdot \frac{\bar{n}^n}{n!} \cdot \exp(-\bar{n}) \quad (6.13)$$

für  $n = 0, 1, 2, \dots$  bis der Wert  $30 \cdot P_{\bar{n}}(n)$  kleiner als 1 ist. Tragen Sie diese Werte über  $n$  in das bestehende Histogramm zu Ihren experimentellen Werten ein. Können Sie bestätigen, dass die gemessene Verteilung der Poisson-Verteilung entspricht (bzw. mit dieser verträglich erscheint)? Betrachten Sie auch die Ergebnisse der anderen Teams.

Die in diesem Versuchsteil nachgewiesene Strahlung setzt sich aus Höhenstrahlung und der Strahlung aus Gesteinen und Bauwerken zusammen. Bei allen späteren Messungen müssen Sie die Untergrundzählrate berücksichtigen (d.h. abziehen), um möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn die bei den Messungen auftretenden Zählraten nur unwesentlich größer sind als die Untergrundzählrate.

### 6.4.2 Abstandsabhängigkeit der Zählrate

#### Aufgabenstellung

1. Berechnen Sie die nach Gleichung 6.9 erwartete Anzahl an Ereignissen, die der Detektor innerhalb von 100 Sekunden registriert, und zwar für die drei Abstände 10, 20 und 50 cm zwischen Zählrohr und verwendetem  $\gamma$ -Strahler (siehe unten). Der aktive Durchmesser (Innendurchmesser des Zählrohrs) beträgt 45 mm. (Hinweise: Denken Sie an das Alter der radioaktiven Quellen. Setzen Sie für die unbekannte Zählrohrnachweiseffizienz zunächst einfach  $\epsilon = 1$  ein.)  
Tragen Sie die Werte in ein doppeltlogarithmisches Diagramm ein und zeichnen Sie den erwarteten Kurvenverlauf ein. Tipp: Skalieren Sie die  $y$ -Achse für die Zählrate auf dem Zeichenpapier so, dass die drei Rechenwerte möglichst am oberen Rand liegen.
2. Führen Sie eine Messreihe zur Abstandsabhängigkeit durch. Messen Sie je 100 Sekunden lang pro Abstandswert. Stellen Sie dazu nacheinander mindestens 5 Abstände ein (z.B. 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm und 30 cm).  
Ziehen Sie von den Werten die Untergrundergebnisse ab (aus der vorhergehenden Messaufgabe) und tragen Sie die so korrigierten Werte in das obige Diagramm ein.
3. Berechnen Sie die Halbwertsdicke von Luft für die  $\gamma$ -Strahlung des verwendeten Präparats (siehe Tabelle 6.1 und 6.2.2). Was bedeutet dies für die Messung?
4. Wie kommt die große Diskrepanz zwischen Erwartung und Messung zustande? Versuchen Sie, die tatsächliche Zählroreffizienz abzuschätzen. Ist der Wert realistisch?

**Versuchsdurchführung** Verwenden Sie als Quelle Cs-137 oder Am-241. Es soll hier nur die  $\gamma$ -Strahlung gemessen werden, stellen Sie zu diesem Zweck die 5 mm dicke Plexiglasplatte vor das Zählrohr. Beim Einstellen der Abstände tritt das Problem auf, dass das Zählrohr ja nicht punktförmig ist, sondern eine relativ große Ausdehnung besitzt. Messen Sie daher die Abstände von der Mitte des Zählrohrs aus. Stellen Sie das Zählgerät auf die "100 s"-Betriebsart um. (Hinweis: Das Zählgerät hört dann automatisch nach 100 s zu zählen auf. Allerdings teilt es das Erreichen der Messzeit nicht explizit mit.)

<sup>5</sup>Die Poisson-Verteilung nach Formel 6.5 liefert die Wahrscheinlichkeit für die Anzahl  $n$ . Um auf die Häufigkeit zu kommen muss die Wahrscheinlichkeit mit der Zahl der Messungen (hier 30) multipliziert werden.

Von den folgenden beiden Messaufgaben können Sie eine auswählen:

### 6.4.3 Halbwertszeitbestimmung

#### Aufgabenstellung

1. Messen Sie die zeitliche Abnahme der Aktivität des kurzlebigen Isotops Pa-234 (Protactinium) und tragen Sie die (korrigierten) Messwerte in ein halblogarithmisches Diagramm ein.
2. Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Halbwertszeit und vergleichen Sie Ihren Wert mit dem Literaturwert.

**Versuchsdurchführung und Auswertung** Diese Messung wird mit einem sogenannten Isotopengenerator<sup>6</sup> durchgeführt. Für die Messung des zeitlichen Aktivitätsverlaufs wird der Messmodus auf "Auto/10s" gestellt. Der Zähler zeigt dabei die Anzahl an Ereignissen der letzten 10 Sekunden an und zählt im Hintergrund weiter. Nach 10 Sekunden wird die Anzeige dann wieder aktualisiert.

Gehen Sie zur Messung folgendermaßen vor: Schütteln Sie den Isotopengenerator einige Sekunden lang und stellen ihn sofort mit der Aussparung in der Abschirmung vor das Zählrohr. Verwenden Sie hier nicht die Plexiglasplatte! Starten Sie ohne Verzögerung den Zähler und notieren Sie (alle 10 Sekunden) den angezeigten Wert. Führen Sie diese Messung 7 Minuten lang durch.

Sie sollten nun eine Tabelle oder Liste von 42 Werten haben. Betrachten Sie nun zunächst die Werte. Sie sollten drei Bereiche unterscheiden können:

- In einem ersten Bereich steigen die Werte mit der Zeit an (abgesehen von den statistischen Fluktuationen, die Ihnen bereits bekannt sind). Dabei handelt es sich um den Entmischungsprozess der beiden Flüssigkeiten im Isotopengenerator. Für die weitere Auswertung sind diese Daten nicht zu gebrauchen.
- In einem zweiten Bereich erkennen Sie einen Rückgang der Werte. In diesem Rückgang steckt der uns interessierende Effekt des radioaktiven Zerfalls des Pa-234.
- In einem dritten Bereich ist kein globaler Auf- oder Abwärtstrend der Werte mehr erkennbar. Hier ist das abseparierte Pa-234 weitgehend zerfallen, man misst nur noch den Untergrund, der sich aus verschiedensten anderen Zerfällen im Isotopengenerator zusammensetzt.

Markieren Sie diese drei Bereiche in Ihrer Liste (so gut wie es eben geht). Bilden Sie nun aus allen Werten des Untergrund-Bereichs den arithmetischen Mittelwert. Diesen Wert verwenden wir nun zur Korrektur. Ziehen Sie von allen Werten des zweiten Bereichs (die den Zerfall wiedergeben) jeweils diesen Korrektur-Wert ab und schreiben Sie

<sup>6</sup>Eine direkte Messung der exponentiellen Aktivitätsabnahme gemäß Gleichung 6.4 ist nur möglich bei Halbwertszeiten, die in der Größenordnung der Messdauer liegen oder kürzer sind. Ein radioaktives Präparat, das ein solches Nuklid als Ausgangsnuklid enthält, kann hier im Praktikum natürlich nicht verwendet werden, da dessen Haltbarkeit naturgemäß sehr begrenzt wäre. Stattdessen verwenden wir einen Isotopengenerator, bei dem das zu untersuchende Nuklid (hier Pa-234) als Tochterkern in der Zerfallsreihe eines langlebigen Nuklids (hier U-238) auftritt. Im vorliegenden Fall wird durch Schütteln das kurzlebige Pa-234 aus dem Uranschlamm in einer der beiden enthaltenen Flüssigkeiten gelöst. Diese Flüssigkeit sammelt sich im oberen Behälterbereich an und die von Pa-234 emittierten  $\beta$ -Teilchen können an der ausgesparten Stelle der Behälterummantelung austreten. Allerdings nimmt der Entmischungsprozess der beiden Flüssigkeiten eine gewisse Zeit in Anspruch, was bei der Auswertung der Messung zu berücksichtigen ist.

die korrigierten Werte der Reihe nach auf. Diese Werte geben jetzt den Netto-Effekt des radioaktiven Zerfalls des Pa-234 wieder.

Tragen Sie nun die so erhaltenen Werte über der Zeit in ein halblogarithmisches Diagramm ein. Legen Sie eine Ausgleichsgerade durch die Messwerte und bestimmen Sie damit die Halbwertszeit.

#### 6.4.4 Abschirmung von Gamma-Strahlung durch Materie

##### Aufgabenstellung

1. Messen Sie die Zählraten, die Sie für verschieden dicke Kupferabschirmungen zwischen radioaktivem Präparat und Zählrohr erhalten. Tragen Sie die Messwerte in ein halblogarithmisches Diagramm ein.
2. Ermitteln Sie aus dem Diagramm die Halbwertsschichtdicke und vergleichen Sie diese mit dem Literaturwert.

**Versuchsdurchführung** Verwenden Sie als Präparat Cs-137 oder Am-241. Um nur den  $\gamma$ -Anteil zu nutzen stellen Sie die Plexiglasplatte vor das Präparat. Führen Sie eine Messreihe durch, wobei Sie ohne Abschirmung beginnen und dann schrittweise die Abschirmdicke durch immer dickere bzw. immer mehr Kupferplatten<sup>7</sup> erhöhen. Der geometrische Abstand zwischen Zählrohr und Präparat darf während der Messreihe natürlich nicht geändert werden! Berücksichtigen Sie dies vorab, damit Sie auch die dickste Abschirmung einfügen können. Achten Sie trotzdem darauf, den Abstand zwischen Zählrohr und Präparat möglichst klein zu wählen, damit Sie größere Zählraten und damit bessere Ergebnisse erhalten. Messen Sie bei jeder Abschirmdicke 100 s lang.

Tipp: Wenn Sie als Präparat Cs-137 verwenden, beginnen Sie bei der Abschirmung gleich mit der 5 mm-Kupferplatte und gehen dann in 5 mm-Schritten weiter (bis mindestens 30 mm). Bei Am-241 müssen Sie dagegen mit der dünnsten Kupferplatte beginnen und in möglichst kleinen Schritten die Abschirmung erhöhen (bis ca. 2 mm).

Tragen Sie die untergrundkorrigierten Messwerte in ein halblogarithmisches Diagramm ein und legen Sie eine Ausgleichsgerade durch Ihre Werte. Anhand dieser Geraden können Sie die Halbwertsschichtdicke bestimmen.

### 6.5 Anhang: Strahlendosis und Strahlenschutz

#### 6.5.1 Definition und Maßeinheiten

**Energiedosis** Als Maß für die primäre physikalische Wirkung von radioaktiver Strahlung wird die auf ein Massenelement durch die Strahlung übertragene Energie verwendet. Diese Größe wird als Energiedosis  $D$  bezeichnet:

$$D = \frac{\text{Energie (durch Strahlung auf Materie übertragen)}}{\text{Masse (der bestrahlten Materie)}} \quad (6.14)$$

Die gesetzliche Einheit ist das Gray (Zeichen Gy;  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ).

Würde die absorbierte Strahlungsenergie nur zur Erwärmung von biologischem Gewebe führen (wie es z.B. bei Mikrowellen der Fall ist), so würde eine Energiedosis von 1 Gy

---

<sup>7</sup>Zur Abschirmung von  $\gamma$ -Strahlung wird in der Technik meistens Blei verwendet, da man mit geringen Materialstärken hohe Abschirmwirkungen erreichen kann. Da Blei aber ein giftiges Schwermetall ist wird in diesem Versuch stattdessen Kupfer verwendet.

natürlich kein Problem darstellen. In 1 kg Wasser führt eine Wärmemenge von 1 J lediglich zu einer Temperaturerhöhung von  $0,00024^\circ\text{C}$ . Die entscheidende Wirkung von radioaktiver Strahlung ist jedoch ihre ionisierende Wirkung, die dazu führt, dass chemische Bindungen in (biologischen) Molekülen (darunter insbesondere im Erbmolekül DNS) aufgebrochen werden. Daher führt eine Energiedosis von 1 Gy bei Ganzkörperbestrahlung bereits zu einer akuten Strahlenkrankheit.

**Äquivalentdosis** Die genaue Wirkung radioaktiver Strahlung auf lebende Organismen ist ein sehr kompliziertes Themengebiet. Insbesondere die gesundheitliche Bewertung niedriger Strahlendosen, wie sie z.B. von der allgegenwärtigen Umgebungsstrahlung verursacht wird, ist bis heute weitgehend ungeklärt.

Wichtig für die biologische Wirkung ist vor allem, auf welcher Längenskala die Strahlungsenergie deponiert wird. Deshalb unterscheiden sich die unterschiedlichen Strahlungsarten deutlich in Ihrer Wirkung. Ein  $\alpha$ -Teilchen kann z.B. seine ganze Energie an eine einzige menschliche Zelle abgeben, was bei einem  $\beta$ -Teilchen nicht der Fall ist. Um für Strahlenschutz Zwecke eine Abschätzung zu bekommen, kann die Energiedosis  $D$  in eine sogenannte Äquivalentdosis  $H$  umgerechnet werden:

$$H = D \cdot q \quad (6.15)$$

Beim Strahlenwichtungsfaktor  $q$  handelt es sich um eine dimensionslose Zahl, daher hat auch die Äquivalentdosis die Einheit J/kg, allerdings wird zur Unterscheidung hier die Einheit Sievert (Zeichen Sv;  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ ) verwendet. Als Richtwerte kann man für die Strahlenwichtungsfaktoren angeben<sup>8</sup>:

Strahlenart	Faktor $q$
Röntgen, $\gamma$ , $\beta$	1
Neutronen	10
$\alpha$ -Strahlung	20

### 6.5.2 Strahlenbelastung im Alltag

Die Belastung durch ionisierende Strahlung stellt für den Menschen kein außergewöhnliches Ereignis dar, sondern ist ständiger Bestandteil unseres Lebens. Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die mittlere effektive Jahresdosis der Bevölkerung in Deutschland (aus einem Bericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, Stand 2005).

Insbesondere durch Anwendungen in der medizinischen Diagnostik wird diese Belastung nochmals deutlich erhöht. Allerdings gibt es hier sehr große Unterschiede bezüglich der Strahlenbelastung. So schlägt beispielsweise eine Röntgen-Zahnaufnahme mit einer sehr geringen Dosis von  $< 0,01 \text{ mSv}$  zu Buche, während bei einer Computertomographieaufnahme des Bauchraums bis zu  $25 \text{ mSv}$  angesetzt werden müssen.

<sup>8</sup>  $\alpha$ -Strahlung hat in Luft nur eine Reichweite von wenigen cm, außerdem werden  $\alpha$ -Teilchen bereits von den obersten Hautschichten gestoppt, die ja zum Teil bereits aus abgestorbenen Zellen bestehen. Strahlenschutztechnisch spielt  $\alpha$ -Strahlung daher nur dann eine wirkliche Rolle, wenn  $\alpha$ -emittierende Nuklide durch Verschlucken oder Einatmen in den Körper aufgenommen werden. Insbesondere nach dem Einatmen wirken  $\alpha$ -Strahler dann aber biologisch sehr schädlich woher der hohe Wichtungsfaktor kommt. Da beim Praktikum nur umschlossene radioaktive Präparate verwendet werden, ist dieser Fall natürlich ausgeschlossen.

terrestrische Strahlung	0,4 mSv
kosmische Strahlung	0,3 mSv
Aufnahme radioaktiver Stoffe durch Nahrung	0,3 mSv
Inhalation von Radon und seinen Zerfallsprodukten	1,1 mSv
<b>Summe natürliche Strahlenexposition</b>	<b>ca. 2,1 mSv</b>
kerntechnische Anlagen	<0,01 mSv
Atombomben-Fallout	<0,01 mSv
Tschernobyl	<0,015 mSv
Forschung, Technik, Haushalt	<0,01 mSv
Medizin (Röntgen, Nuklearmedizin)	2,0 mSv
<b>Summe zivilisatorische Strahlenexposition</b>	<b>ca. 2,0 mSv</b>
<b>Insgesamt</b>	<b>ca. 4,1 mSv</b>

### 6.5.3 Abschätzung der Strahlenbelastung im Praktikum

Um ein Gefühl dafür zu bekommen, welche zusätzliche Strahlenbelastung Sie durch den Praktikumsversuch erhalten, soll im Folgenden diese Strahlenbelastung grob abgeschätzt werden. Dazu nehmen wir an, dass Sie sich 4 Stunden lang in einer Entfernung von 0,5 m von der Cs-137 Quelle aufhalten. Für den  $\gamma$ -Anteil<sup>9</sup> der Strahlung kann folgende Formel für die Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}$  (= Äquivalentdosis pro Zeit) verwendet werden:

$$\dot{H} = \Gamma_H \cdot \frac{A}{r^2} \quad (6.16)$$

Hier begegnet uns wieder die quadratische Abnahme der Dosisleistung mit wachsendem Abstand  $r$ . Die ( $\gamma$ -)Dosisleistungskonstante von Cs-137 beträgt  $\Gamma_{H, 137\text{Cs}} = 9 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Sv m}^2}{\text{h Bq}}$ . Somit ergibt sich (als grobe Abschätzung!):

$$H_{\text{Praktikum}} = \Delta t \cdot \dot{H} = \Delta t \cdot \Gamma_H \cdot \frac{A}{r^2} = 4 \text{ h} \cdot 9 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Sv m}^2}{\text{h Bq}} \cdot \frac{37 \cdot 10^3 \text{ Bq}}{(0,5 \text{ m})^2} = 0,00005 \text{ mSv} \quad (6.17)$$

Beim Vergleich mit den Daten aus obiger Tabelle erkennen Sie, dass die Strahlenbelastung durch den Praktikumsversuch deutlich unter der Strahlenbelastung liegt, die Sie durch die terrestrische oder kosmische Strahlung<sup>10</sup> in einem Jahr erhalten. Sogar wenn Sie sich ein Jahr lang neben der Cs-137 Quelle aufhalten ist die jährliche natürliche Strahlenbelastung höher.

Beherzigen Sie bitte trotzdem die in Kapitel 6.3 aufgeführten Verhaltensregeln, die grundsätzlich beim Umgang mit radioaktiven Präparaten zu beachten sind.

<sup>9</sup>Cs-137 emittiert auch  $\beta$ -Strahlung. Die Abschätzung dieses Anteils ist deutlich komplizierter, da die  $\beta$ -Teilchen in Luft bereits deutlich abgebremst werden und man kein einfaches Abstandsgesetz angeben kann. Außerdem wird, je nachdem welche Richtung man betrachtet, ein Teil der  $\beta$ -Energie bereits in der Quelle absorbiert bzw. die  $\beta$ -Teilchen werden komplett in der Quelle gestoppt.

<sup>10</sup>Die terrestrische und kosmische Strahlenbelastung hängt naturgemäß vom Wohnort ab. In Deutschland gibt es dazu momentan ca. 1800 Messstationen. Aktuelle Werte zu den einzelnen Orten finden Sie unter: <http://odlinfo.bfs.de/>



