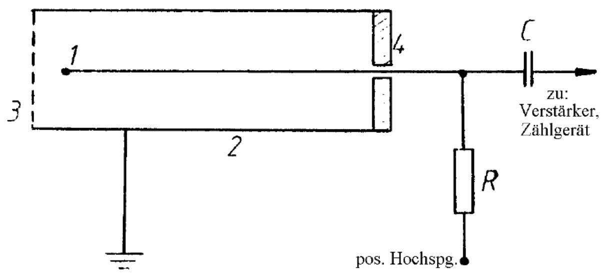
4.2 Messung radioaktiver Strahlung mit einem GEIGER-MÜLLER-Zähler

1 Grundlagen

Radioaktive Strahlung entsteht beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen. Man unterscheidet α-, β- und γ-Strahlung. Während α- und β-Strahlung aus Teilchen besteht, stellt γ-Strahlung hochenergetische elektromagnetische Wellen dar. Zum Nachweis und zur Messung der Intensität radioaktiver Strahlung wird ein Geiger-Müller-Zähler verwendet.

Das Geiger-Müller-Zählrohr besteht aus einem metallischen Hohlzylinder, in dessen Symmetrieachse der sogenannte Zähldraht angebracht ist. Zwischen dem Gehäuse des Zählrohrs (2) und dem Zähldraht (1) besteht eine hohe elektrische Spannung. Durch ein dünnes Fenster (3) an der Stirnseite können α- und β-Teilchen in das Innere des Zählrohrs treten. (Vorsicht, das Fenster nicht berühren!) Das Zählrohr enthält ein geeignetes Gemisch aus einem meist einatomigen Zählgas und dem mehratomigen Löschgas.



Dringen α- oder β-Teilchen in das Innere des Zählrohrs ein, so ionisieren sie entlang ihrer Bahn die Atome bzw. Moleküle der Gasfüllung (Stoßionisation). Durch γ-Quanten werden Atome in der Wandung des Hüllrohres ionisiert. Die freigewordenen Elektronen werden aufgrund der angelegten Hochspannung zum Zähldraht beschleunigt. Nach einer kurzen Beschleunigungsstrecke können diese primären Elektronen ihrerseits weitere Stoßionisationen hervorrufen. Dieser Vorgang wiederholt sich und es kommt bei genügend hoher Spannung zur Ausbildung einer *Elektronenlawine*. Die Zahl der primären Elektronen wird dabei um den Faktor 10^6 bis 10^8 verstärkt. Die Elektronen treffen auf den Zähldraht und rufen am Arbeitswiderstand R einen Spannungsimpuls hervor, der über einen Kondensator zum Verstärker geführt wird und in einem Zählgerät registriert wird. Die Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit wird als *Zählrate* bezeichnet.

2 Aufgabenstellung

1. Bestimmung des Urangehaltes eines Uranoxid-Präparates (U_2O_5) durch Vergleich der Zählraten mit einem Uran-Standardpräparat (U_3O_8) bekannter Uranmasse.
2. Untersuchung der Abhängigkeit der Zählrate vom Abstand zwischen Quelle und Zählrohr für das Uran-Standardpräparat.
3. Bestimmung der Halbwertsdicke von Blei mit der γ-Strahlungsquelle Cäsium-137

3 Erforderliche Geräte

1	Uran-Standard (U_3O_8)	1	Geiger-Müller-Zählplatz
1	Uranoxid-Strahler (U_2O_5)	8	Bleiplatten verschiedener Dicken
1	Zäsium-γ-Strahler		

4 Versuchsdurchführung

Für alle Versuche wird die Hochspannung für das Zählrohr auf den Wert 1150 V eingestellt.

4.1 Urangehalt

Die unbekannte Uranmasse im Präparat m_y errechnet sich aus dem Verhältnis der Zählraten des Präparates R_y und des Standardpräparates R_S

$$m_x = m_S \cdot \frac{R_y}{R_S} \tag{1}$$

Die Uranmasse des Standardpräparates m_S beträgt 85,6 mg Uran, entsprechend 100 mg U_3O_8 mit der relativen Unsicherheit von 1%.

Vorgehensweise

- Die Zählrate wird zuerst für das Standardpräparat, dann für das Präparat mit unbekannter Uranmasse gemessen.
- Danach wird die Zählrate *ohne* Präparat gemessen, um den Nulleffekt, der sich aus der natürlichen Radioaktivität ergibt, bei der Auswertung berücksichtigen zu können.
- Die Messungen werden jeweils 10 mal durchgeführt mit einer Messzeit von 30 s.

4.2 Abstandsabhängigkeit

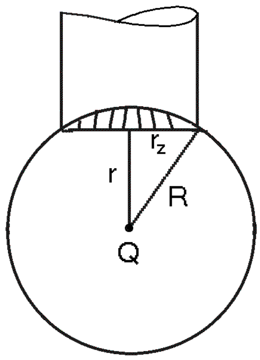
Der Wirkungsgrad des Messplatzes ist definiert als Verhältnis der gemessenen Zählrate R_N zur Emissionsrate der Strahlungsquelle R_E:

$$\eta = \frac{R_N}{R_E} \tag{2}$$

Die Emissionsrate R_E entspricht der Anzahl von Zerfallsereignissen pro Zeiteinheit für das Präparat. Sie errechnet sich aus

$$R_E = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{A_r} \cdot N_A = \frac{\ln 2}{4,5 \cdot 10^9\,\mathrm{a}} \cdot \frac{m}{238\,\mathrm{g/mol}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol}^{-1} \tag{3}$$

Hier ist $T_{1/2}$ die Halbwertszeit, A_r die relative Atommasse des Urans (U-238) und m die Uranmasse in g. Es soll die Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Abstand r zwischen Quelle und Zählrohr untersucht werden.



Befindet sich am Ort Q eine punktförmige Strahlungsquelle, die ihre Strahlen gleichmäßig in alle Raumrichtungen aussendet, so ist der geometrische Anteil η der Strahlung, die auf das Zählrohrfenster trifft, gegeben durch das Flächenverhältnis

$$\eta = \frac{A_{Kugelsegment}}{A_{Kugel}} = \frac{2\pi R\,(R-r)}{4\pi R^2} \tag{4}$$

mit r Abstand Quelle-Zählrohrfenster, $R = \sqrt{r^2 + a^2}$ und a Radius des Fensters.

Einsetzen von R ergibt für den geometrischen Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (a/r)^2}}\right) \tag{5}$$

Wenn der Abstand zum Zählrohrfenster groß ist ($r >> a$), dann folgt aus der Entwicklung in eine Potenzreihe

$$\eta \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{a^2}{r^2} \tag{6}$$

die zu erwartende $1/r^2$-Abhängigkeit der Intensität punktförmiger Strahlungsquellen für große Abstände.

Vorgehensweise

- Messen Sie die Zählrate der Strahlung des Standardpräparates für 4 geeignet gewählte Abstände (je 5 mal) mit einer Messzeit von 30 s.
- Der Radius des hier verwendeten Zählrohrfensters beträgt $a = (12{,}5 \pm 0{,}5)$ mm

4.3 Abschirmwirkung

Das Isotop Cäsium-137 geht durch β-Zerfall über in Barium-137. Dabei werden γ-Quanten emittiert. Treffen diese γ-Quanten auf Materie (z.B. eine Bleischicht), so werden sie zum Teil absorbiert.

Auf Grund der Absorption nimmt die Intensität der γ-Strahlung in homogener Materie exponentiell mit der Schichtdicke x ab:

$$I(x) = I_0 \cdot \mathrm{e}^{-\mu \cdot x} \tag{7}$$

Der Absorptionskoeffizient μ nimmt zu mit der Dichte des Stoffes und der Anzahl der Elektronen pro Atom. Deshalb eignet sich Blei besonders gut zur Abschirmung von γ-Strahlung.

Die Halbwertsschichtdicke $x_{1/2}$ eines Stoffes ist die Schichtdicke, bei der sich die Intensität der Strahlung halbiert:

$$I(x_{1/2}) = \frac{1}{2} \cdot I_0 \tag{8}$$

Der Zusammenhang zwischen Halbwertsbreite und Absorptionskoeffizient ergibt sich dann durch Einsetzen von (7)

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \tag{9}$$

Vorgehensweise

- Die Zählrate der Strahlung der Cs-137–Quelle wird mit einer Messzeit von 2 min bei konstantem Abstand gemessen. Wählen Sie zunächst einen geeigneten Abstand durch Probemessungen ohne Bleichschicht und mit maximaler Schichtdicke.
- Messen Sie die Zählraten ohne Blei und für 5 verschiedene Schichtdicken von Blei durch sukzessives Auflegen von Bleiplatten.

5 Auswertung

5.1 Urangehalt

- Für alle Messreihen sind zunächst die Mittelwerte und Standardabweichungen der Zählraten auf das Zeitintervall 1 s bezogen zu bestimmen.
- Aus den Messraten R_M für die beiden Präparate ist jeweils die Nutzrate R_N zu berechnen durch Subtraktion der Nullrate R_0

$$R_N = R_M - R_0 \tag{10}$$

- Berechnen Sie die Masse des Urans im unbekannten Präparat gemäß Formel (1). Berechnen Sie den Unsicherheitsbereich durch Fehlerfortpflanzungsrechnung aus der statistischen Unsicherheit der gemessenen Zählraten.

5.2 Abstand

- Berechnen Sie für jeden Abstand die Mittelwerte der Zählraten unter Abzug des Nulleffektes.
- Berechnen Sie aus den Mittelwerten den experimentellen Wirkungsgrad η_{exp} für jeden Abstand.

- Stellen Sie die experimentellen und die geometrischen Werte des Wirkungsgrades als Funktion des Abstandes graphisch dar. Entscheiden Sie vorher, ob für η_{geom} die Näherungsformel (6) verwendet werden kann. Markieren Sie den Unsicherheitsbereich für die experimentellen Werte.
- Diskutieren Sie die Abweichungen der beiden Kurven.

5.3 Abschirmung

- Stellen Sie die Größe $Z(x) = \ln(R(x)/R(0))$ als Funktion der Schichtdicke x graphisch dar.
- Durch Logarithmieren von Formel (7)

$$\ln\left(\frac{R(x)}{R(0)}\right) = -\mu \cdot x \tag{11}$$

  findet man, dass die Größe $Z(x)$ proportional zur Schichtdicke x ist.
  Bestimmen Sie den Proportonalitätsfaktor μ aus dem Anstieg der linearen Regressionsgeraden der Messpunkte $Z(x_i)$ und x_i. Berechnen Sie daraus gemäß (9) die Halbwertsbreite für Blei.