

In diesem Versuch werden die Halbwertszeiten von Elementen untersucht, die über eine Milliarde Jahre betragen. Dies geschieht mithilfe des Programms LabView und einer Messapparatur, die vor allem aus einem Proportionalzählrohr besteht, sowohl einer Elektronikschaltung, in der verschiedene Parameter eingestellt werden können. Untersucht werden die Elemente  $^{147}\text{Sm}$  und  $^{40}\text{K}$ . Während  $^{147}\text{Sm}$  ein reiner  $\alpha$ -Strahler ist, treten bei  $^{40}\text{K}$  zwei Arten des Zerfalls auf, bei dem jedoch nur der  $\beta^-$ -Zerfall detektiert wird. Um das  $\alpha$ - und das  $\beta$ -Plateau für diese Messungen zu finden, wird zunächst  $^{238}\text{U}$  gemessen, welches zuerst in einem  $\alpha$ -Zerfall zu  $^{234}\text{Th}$  und dieses in einem  $\beta^-$ -Zerfall zu  $^{234}\text{Pa}$  zerfällt. Das Ziel des Versuchs besteht darin, die Halbwertszeiten von  $^{147}\text{Sm}$  und  $^{40}\text{K}$  zu ermitteln.

Die ermittelten Halbwertszeiten betragen  $T_{1/2}(^{147}\text{Sm}) = (1.27 \pm 0.03) \times 10^{11}\text{a}$  und  $T_{1/2}(^{40}\text{K}) = (2.29 \pm 0.06) \times 10^9\text{a}$ .

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
1.1. Zerfallsgesetz . . . . .	5
1.2. Zerfallsarten . . . . .	5
1.2.1. $\alpha$ -Zerfall . . . . .	5
1.2.2. $\beta^-$ -Zerfall . . . . .	6
1.2.3. Elektroneneinfang . . . . .	6
1.3. Zerfallsreihen . . . . .	6
1.4. Korrekturen für die Zählraten . . . . .	6
1.4.1. Korrektur bei $\alpha$ -Strahlung . . . . .	6
1.4.2. Korrektur bei $\beta$ -Strahlung . . . . .	7
1.5. Proportionalzählrohr . . . . .	8
<b>2. Versuchsaufbau</b>	<b>10</b>
<b>3. Durchführung und Messverfahren</b>	<b>12</b>
3.1. Funktion der verschiedenen Einstellungen . . . . .	12
<b>4. Auswertung</b>	<b>13</b>
4.1. Untergrund . . . . .	13
4.2. Zählrohrcharakteristik $^{238}\text{U}$ . . . . .	13
4.3. Zählrohrcharakteristik $^{147}\text{Sm}$ . . . . .	14
4.4. Halbwertszeit von $^{147}\text{Sm}$ . . . . .	15
4.5. Zählrohrcharakteristik $^{40}\text{K}$ . . . . .	16
4.6. Halbwertszeit von $^{40}\text{K}$ . . . . .	17
<b>5. Fehlerdiskussion</b>	<b>19</b>
5.1. $^{147}\text{Sm}$ . . . . .	19
5.2. $^{40}\text{K}$ . . . . .	19
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>21</b>
<b>A. Diagramme</b>	<b>23</b>
<b>B. Tabellen</b>	<b>24</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Zusammenhang des Raumwinkels $\Omega(x)$ und der Wegstrecke [KOT, 38] . . . . .	6
1.2.	Skizze zur Herleitung der Selbstabsorptionskorrektur bei $\beta$ -Strahlung [KOT, S. 39] . . . . .	8
1.3.	Schematische Darstellung des Durchflusszählrohres, [KOT, S. 34] . . . . .	9
1.4.	Unterschiedliche Betriebsbereiche des Zählrohres, [KOT, S. 35] . . . . .	9
2.1.	Bild des Versuchsaufbaus [KOT, S. 30] . . . . .	10
2.2.	$2\pi$ -Zählrohr . . . . .	10
2.3.	Blockschaltbild des Versuchs [KOT, S. 30] . . . . .	11
4.1.	Untergrundmessung mit $\Delta t = 2000$ s . . . . .	13
4.2.	Zählrohrcharakteristik $^{238}\text{U}$ mit $\Delta t = 2000$ s . . . . .	14
4.3.	Zählrohrcharakteristik $^{147}\text{Sm}$ . . . . .	14
4.4.	Zählrohrcharakteristik $^{40}\text{K}$ . . . . .	16
4.5.	Diagramm der Messreihen von $^{40}\text{K}$ inklusive Fit . . . . .	17
5.1.	Diagramm der Messreihen von $^{40}\text{K}$ ohne die ersten 3 Punkte . . . . .	20
A.1.	Zählrohrcharakteristik $^{147}\text{Sm}$ , erste Messung . . . . .	23

# Tabellenverzeichnis

4.1.	Ermittelte Durchmesser und gemittelter Radius des verwendeten Al-Schälchens .	15
B.1.	Messdaten zu Abbildung 4.1 . . . . .	24
B.2.	Messdaten zu Abbildung 4.2 . . . . .	25
B.3.	Messdaten zu Abbildung 4.3 . . . . .	26
B.4.	Messdaten zu Abbildung 5.1 . . . . .	26
B.5.	Messdaten zu Abbildung 4.4 . . . . .	27

# 1. Theoretische Grundlagen

## 1.1. Zerfallsgesetz

Viele Isotope von Elementen sind instabil. Das heißt, dass sie zerfallen können. Dieser Prozess ist statistisch, wobei die zeitliche Änderung der Anzahl der Atome durch

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \quad (1.1)$$

gegeben ist. Hierbei bezeichnet  $\lambda$  die isotopenspezifische Zerfallskonstante. Dies liefert nach Integration das Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.2)$$

wobei  $N_0 = N(0)$  entspricht. Bei radioaktiven Zerfällen ist die sogenannte Halbwertszeit  $T_{1/2}$

$$N(T_{1/2}) = 0.5 \cdot N_0 \quad (1.3)$$

$$\Leftrightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.4)$$

interessant, die angibt, nach welcher Zeit die Hälfte der Atome zerfallen sind. Diese hängt auch mit dem negativen der zeitlichen Ableitung des Zerfallsgesetzes, der Aktivität  $A$

$$A = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t) = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N(t) \quad (1.5)$$

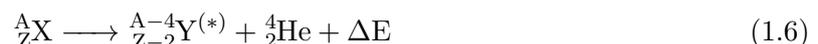
zusammen.

## 1.2. Zerfallsarten

Es gibt verschiedene Arten von Zerfällen. Für diesen Versuch spielen der  $\alpha$ - und der  $\beta^-$ -Zerfall, sowie der Elektroneneinfang eine Rolle.

### 1.2.1. $\alpha$ -Zerfall

Kerne mit großen Kernladungszahlen sind häufig instabil. Das liegt daran, dass es für den Kern energiegiünstiger ist, unter Aussendung eines Heliumkernes in einen Tochterkern zu zerfallen.



Dabei bezeichnet  $\Delta E$  den Massendefekt, der sich entweder nur als kinetische Energie des Heliumkernes He und des Tochterkerns Y bemerkbar macht oder zusätzlich den Mutterkern X in einen angeregten Tochterkern  $Y^*$  zerfallen lässt. Für den  $\alpha$ -Zerfall ist der Tunneleffekt essentiell, weil klassisch gesehen der He-Kern den Coulombwall, dessen Höhe etwa 20 bis 30 MeV beträgt, mit seinen 3 bis 8 MeV nicht überwinden kann. Da quantenmechanisch die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Teilchens mit einer Wellenfunktion beschrieben wird, die im Coulombwall und außerhalb ungleich null ist, kann dieses Teilchen durchtunneln, wodurch es zum  $\alpha$ -Zerfall kommen kann.

### 1.2.2. $\beta^-$ -Zerfall

Bei einem Neutronenüberschuss kann es zu einem  $\beta^-$ -Zerfall kommen. Dabei wandelt sich ein Neutron im Kern unter Aussendung eines Elektrons und eines Antineutrinos in ein Proton um. Deshalb erhöht sich die Kernladungszahl um eins. Das Elektron und das Antineutrino können problemlos „fliehen“, da sie als Leptonen nicht der starken Wechselwirkung unterliegen:



### 1.2.3. Elektroneneinfang

Beim Elektroneneinfang wird ein Elektron aus der niedrigsten Schale, der K-Schale, vom Kern eingefangen, wodurch ein Proton unter Aussendung eines Elektronenneutrinos zum Neutron wird. Dementsprechend verringert sich die Kernladungszahl um eins. Bei größeren Atomen ist diese Art der Radioaktivität deutlich ausgeprägter, da dort die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons im Kern sehr hoch ist.



Das Elektron, welches aus der K-Schale gerissen wurde, wird durch ein Elektron einer höheren Schale aufgefüllt, wobei die Energiedifferenz durch Aussenden eines Photons kompensiert wird.

## 1.3. Zerfallsreihen

Manche radioaktiven Atome zerfallen weiter in ebenfalls instabile Atome (die ggf. wieder radioaktiv sind). Dies wird als Zerfallsreihe bezeichnet. Ein Beispiel ist  ${}^{238}\text{U}$ , bei dem zunächst ein  $\alpha$ - und danach ein  $\beta^-$ -Zerfall stattfindet:



## 1.4. Korrekturen für die Zählraten

In diesem Versuch werden Proben radioaktiver Materialien untersucht. Dabei werden Zählraten aufgenommen, bei denen Korrekturen durchgeführt werden müssen.

### 1.4.1. Korrektur bei $\alpha$ -Strahlung

Durch die Selbstabsorption der Probe können nur die  $\alpha$ -Teilchen detektiert werden, deren Wegstrecken  $r$  durch die Probe größer als die Reichweite ist. Diese ist in Abbildung 1.1 mit dem Raumwinkel  $\Omega(x)$  und der Schichtdicke  $x$  verknüpft.

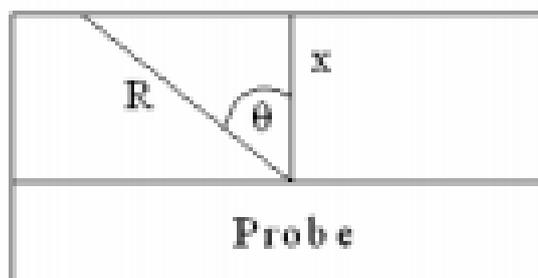


Abbildung 1.1.: Zusammenhang des Raumwinkels  $\Omega(x)$  und der Wegstrecke [KOT, 38]

Der Raumwinkel lässt sich durch Ausnutzen von  $\theta_{max}(x) = \arccos\left(\frac{x}{R}\right)$  mithilfe von

$$\Omega(x) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_{max}(x)} \sin(\theta) d\theta = 2\pi \left(1 - \frac{x}{R}\right) \quad (1.10)$$

ermitteln. Daraus folgt die Impulsrate  $n$  nach

$$n = \frac{A}{d} \cdot \int_0^R \frac{\Omega(x)}{4\pi} = \frac{A_V \cdot F}{4\pi} \cdot \int_0^R \Omega(x) dx = \frac{A_V \cdot F \cdot R}{4} \quad (1.11)$$

wobei  $d = \frac{F}{V}$  die Dicke,  $F$  die Oberfläche,  $V$  das Volumen der Probe und  $A_V$  die Aktivität pro Volumen ist. Da die Reichweite jedoch unbekannt ist, wird später die Näherung von Bragg und Cleeman verwendet.

Mithilfe von (1.5) folgt für die Halbwertszeit

$$T_{1/2} = \ln 2 \cdot \frac{N(t)}{A} = \ln 2 \cdot \frac{N(t)}{A_V \cdot V} \stackrel{(1.11)}{=} \ln 2 \cdot \frac{N(t) \cdot F \cdot R}{4 \cdot n \cdot V} \stackrel{d=\frac{F}{V}}{=} \ln 2 \frac{N(t) \cdot R}{4 \cdot n \cdot d} \quad (1.12)$$

Die Anzahl der radioaktiven Kerne  $N$  lässt sich mit

$$N = 2 \cdot h \cdot N_{\text{Molekül}} = 2 \cdot h \frac{m \cdot N_A}{M_{\text{Molekül}}} = 2 \cdot h \frac{\rho \cdot F \cdot d \cdot N_A}{M_{\text{Molekül}}} \quad (1.13)$$

berechnen, wobei  $h$  die relative Häufigkeit des radioaktiven Isotops ist,  $\rho$  die Dichte und  $M$  die molare Masse der Probe ist.

Eingesetzt in (1.12) ergibt sich schließlich für die Halbwertszeit

$$T_{1/2} = \ln 2 \frac{R \cdot \rho}{2 \cdot n} \cdot \frac{h \cdot F \cdot N_A}{M_{\text{Molekül}}} \quad (1.14)$$

#### 1.4.2. Korrektur bei $\beta$ -Strahlung

Bei der  $\beta$ -Strahlung muss zusätzlich zur Selbstabsorption der Probe auch die Rückstreuung an der Behälterwand mit einbezogen werden. Außerdem findet hier nicht nur  $\beta$ -Zerfall statt, sondern auch Elektroneneinfang (EE). Das Verhältnis davon ergibt sich zu

$$\frac{P(\beta^-)}{P(\text{EE})} = \frac{89.28\%}{10.72\%} \approx \frac{100}{12} \quad (1.15)$$

wodurch die Zerfallskonstante zu

$$\lambda = \lambda_{\beta^-} + \lambda_{\text{EE}} = 1.12\lambda_{\beta^-} \quad (1.16)$$

und damit die Halbwertszeit nach (1.4) zu

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{1.12\lambda_{\beta^-}} = \frac{T_{1/2}(\beta^-)}{1.12} \quad (1.17)$$

wird.

Um der Selbstabsorption genüge zu tun, wird die spezifische Aktivität  $A_S$ , welche sich aus der Normierung der Aktivität auf die Masse ergibt, betrachtet. Gemessen wird dabei die Impulsrate über einer bestimmten Fläche in Abhängigkeit der Masse. Zunächst wird dafür eine infinitesimale Schicht der Probe betrachtet, wie sie in Abbildung 1.2 zu sehen ist.

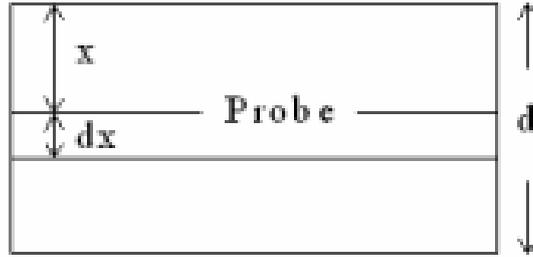


Abbildung 1.2.: Skizze zur Herleitung der Selbstabsorptionskorrektur bei  $\beta$ -Strahlung [KOT, S. 39]

Für die Impulsrate  $n$  gilt nach dem Absorptionsgesetz

$$dn \propto A_S \cdot F \cdot \rho \cdot e^{-\mu \cdot x} dx \quad (1.18)$$

mit den Materialkonstanten  $\rho$  als Dichte und  $\mu$  als Absorptionskoeffizienten, sowie  $F$  als Oberfläche der Probe. Die Integration bis zur Schichtdicke  $d$  liefert

$$n = \int_0^d A_S \cdot F \cdot \rho \cdot e^{-\mu \cdot x} dx = \frac{A_S \cdot F \cdot \rho}{\mu} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot d}) \quad (1.19)$$

Mit  $m = \rho \cdot F \cdot d$  wird dies zu

$$n(m) = \frac{A_S \cdot F \cdot \rho}{\mu} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu \cdot m}{F \cdot \rho}}\right) \quad (1.20)$$

Zuletzt muss die Rückstreuung mit in Betracht gezogen werden. Einerseits wird die Reflexion mit einem Faktor  $f_B$  und andererseits der endliche Raumwinkel  $\Omega$  berücksichtigt. Damit folgt als vollständige Korrektur

$$n(m) = f_B \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \frac{A_S \cdot F \cdot \rho}{\mu} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu \cdot m}{F \cdot \rho}}\right) \quad (1.21)$$

## 1.5. Proportionalzählrohr

Zur Detektion von Strahlung werden häufig Gas-Detektoren eingesetzt. Für  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung eignet sich das Proportionalzählrohr. Dieses liefert eine Ausgangsamplitude, die proportional zum Energieverlust der einfallenden Teilchen ist.

Dieses ist in unserem Fall ein zylindrisches Durchflusszählrohr, in welcher die Strahlung eine Substanz im gasförmigen Zustand ionisiert. In der Kammer verläuft ein U-förmiger Draht, auf den eine positive Hochspannung gelegt wird, während der Mantel geerdet ist. Durch die Form kommt es in der Nähe des Drahtes, zu dem die Elektronen, die durch die Ionisation frei werden, hingezogen werden, zu einem extrem hohen elektrischen Feld. Dadurch wird den Elektronen genügend Energie zugeführt, sodass sie weitere Atome ionisieren können und es so zu einer Elektronenlawine kommt. Die Gasverstärkung drückt aus, wie viele Elektronen in einer Elektronenlawine sind, die Größenordnung beträgt hier  $10^5$ . Damit die Strahlung immer gleiche Ergebnisse liefern kann, wird das Zählrohr mit Gas durchspült, sodass das Gas im Zählrohr immer gleich ionisiert ist. Dies ist in Abbildung 1.3 dargestellt.

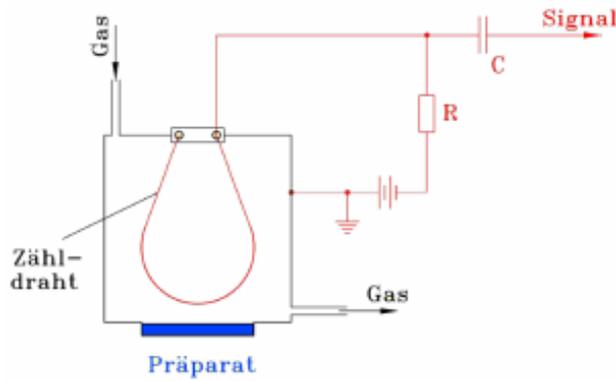


Abbildung 1.3.: Schematische Darstellung des Durchflusszählrohres, [KOT, S. 34]

Da nur Strahlung in Richtung des oberen Halbraums detektiert werden kann, ist der maximale Raumwinkel  $\Omega = 2\pi$ . Daher folgt der Name  $2\pi$ -Zählrohr.

Ein Gas-Zählrohr kann in verschiedenen Bereichen betrieben werden. Das Proportionalzählrohr wird im Proportionalbereich betrieben. Dieser ist in Abbildung 1.4, Bereich III, skizziert, wobei die U-Achse von der Probe abhängig ist.

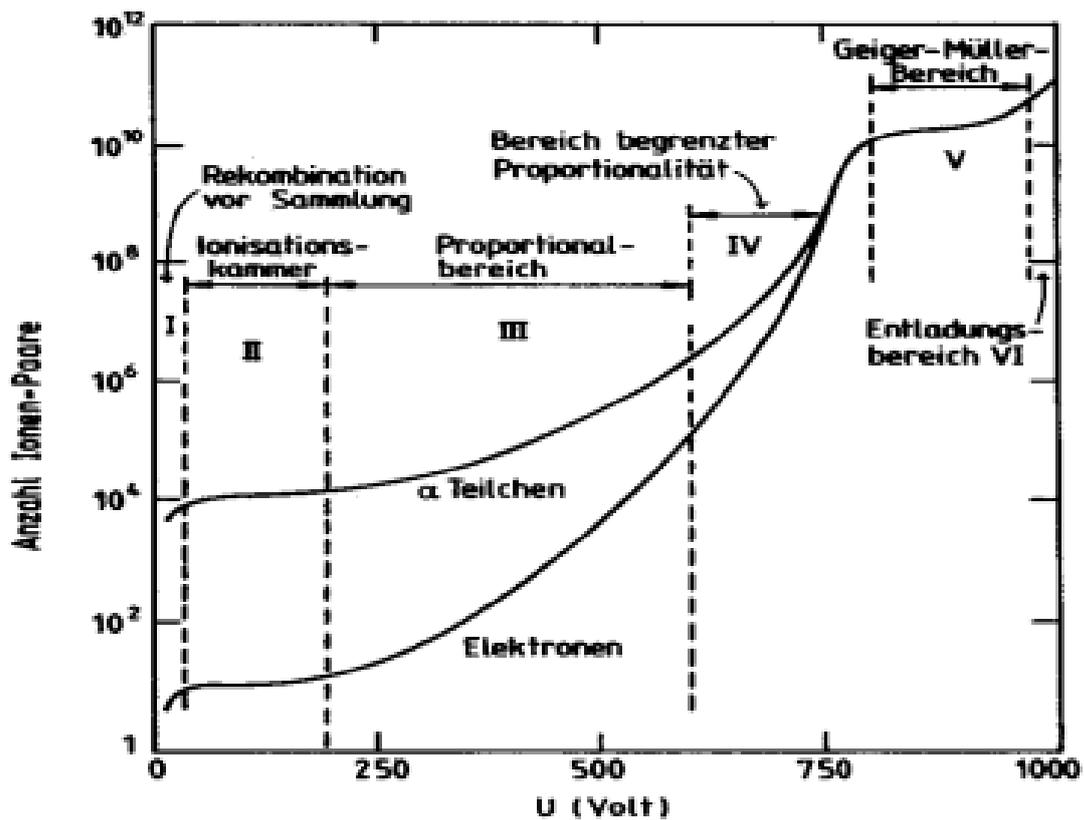


Abbildung 1.4.: Unterschiedliche Betriebsbereiche des Zählrohres, [KOT, S. 35]

## 2. Versuchsaufbau

Der Versuch besteht insgesamt aus einem Proportionalzählrohr, einem Oszilloskop und einer Elektronikeinrichtung, um die Signale des Zählrohrs zu verarbeiten, welche durch das Programm LabView gesteuert werden kann. Im linken Bild der Abbildung 2.1 ist das Oszilloskop sowie die Elektronik und das Zählrohr zu sehen. Im rechten Bild ist eine Vergrößerung der Elektronik abgebildet.

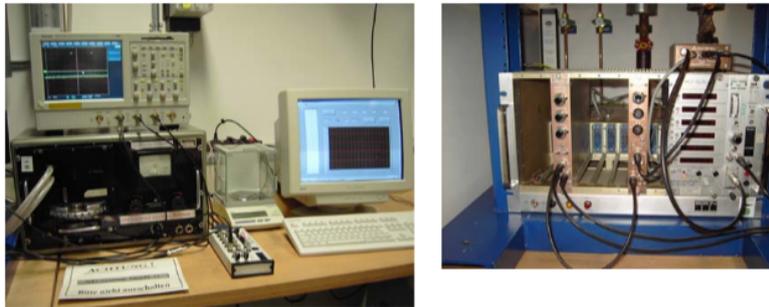


Abbildung 2.1.: Bild des Versuchsaufbaus [KOT, S. 30]

Das  $2\pi$ -Zählrohr ist in Abbildung 2.2 zu sehen. In die Öffnung wird die Probe gelegt, die nur nach oben geöffnet ist, da nur in der oberen Halbebene Signale detektiert werden können. Der Schlauch ist für die Methan-Zufuhr da und über dem Drehteller zu sehen.

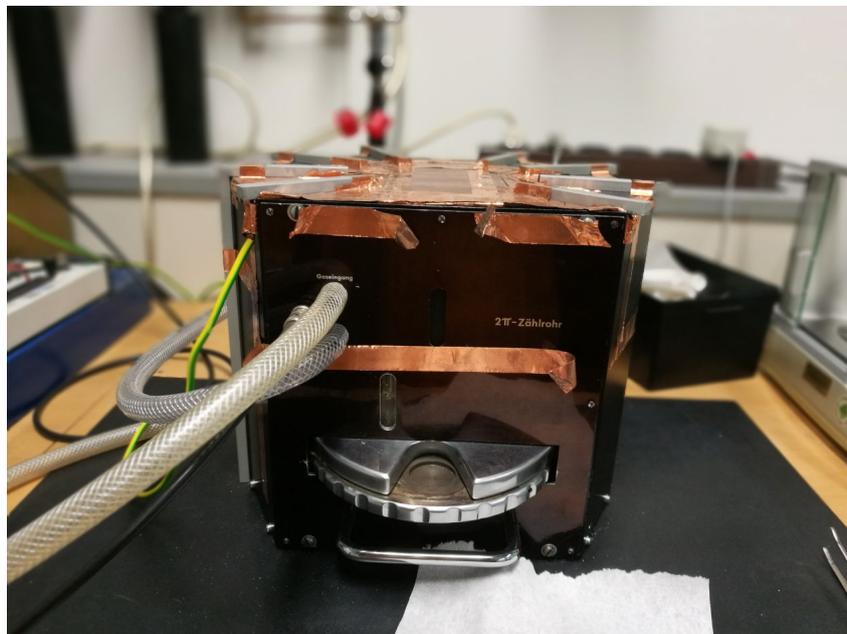


Abbildung 2.2.:  $2\pi$ -Zählrohr

Beim Zerfall wechselwirken die Elektronen oder Heliumkerne mit dem Gas, wodurch ein Strompuls detektiert wird, welcher zum Vorverstärker (VV) geleitet wird, worin dieser Strompuls in ein Spannungssignal umgewandelt wird. Von dort aus wird das Signal weiter zum Hauptverstärker

(HV) geleitet, der Rauschen und statistische Schwankungen durch Differentiation und Integration herausgemittelt. Danach geht das Signal über einen Verstärker in den Einkanalanalysator. Am Verstärker kann eingestellt werden, ab wann ein Signal detektiert werden soll (lower-level), da ohne diese Einstellung die Anzahl der Signale explodiert. Des Weiteren kann die shaping-time und die Verstärkung eingestellt werden. In dem LabView-Programm werden dann die Messparameter wie Start- und Endspannung der Messung, sowie die Messzeit pro Messschritt und den Spannungsabstand einzelner Messschritte eingestellt. In Abbildung 2.3 ist ein Blockschaltbild des beschriebenen Ablaufes dargestellt.

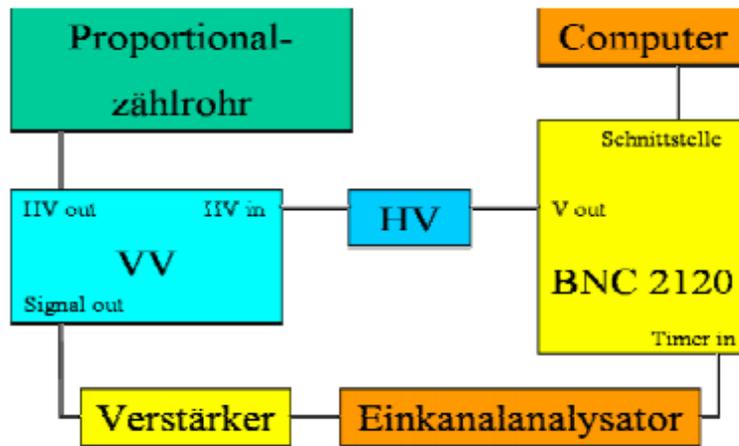


Abbildung 2.3.: Blockschaltbild des Versuchs [KOT, S. 30]

## 3. Durchführung und Messverfahren

### 3.1. Funktion der verschiedenen Einstellungen

Zunächst werden die verschiedenen Einstellungen der Elektronik getestet. Die shaping-Zeit bestimmt die Zeit, mit der der Integrator jeden gemessenen Puls integriert. Ist diese zu groß eingestellt, so wird die Tot-Zeit des Detektors unnötig groß. Ist sie jedoch zu gering eingestellt, so wird gegebenenfalls nicht der gesamte Puls integriert und deshalb nicht als Signal registriert. Die Shaping-Time wird auf  $2\ \mu\text{s}$  eingestellt, da bei diesem Wert der Großteil der Pulse registriert wird. Anschließend wird die untere Schwelle des Detektors eingestellt. Bei einem hohen Wert wird die Sensitivität des Detektors eingeschränkt, wohingegen ein zu niedriger Wert die Sensitivität zu stark erhöht und der Detektor Signale nicht mehr zuverlässig vom Untergrund trennen kann. Ein Wert von 0.5 Skalenwerten liefert ein ideales Verhältnis. Bei einem Skalenwert von 20 ist die Verstärkung am sinnvollsten für den Versuch.

Die Spannungsquelle benötigt eine 15-minütige Aufwärmzeit, während der die Gasversorgung eingeschaltet wird, um einen konstanten Gasfluss zu erhalten. Der Druck des Gases schwankt zwischen 0.35 und 0.4 bar.

Im nächsten Schritt wird mithilfe des LabView Programms die Zählrohrcharakteristik von  $^{238}\text{U}$  aufgenommen. Die Probe wird in eine funktionstüchtige Messkammer gedreht. Es werden die Zählraten in einem Spannungsbereich von  $U = [1000\ \text{V}, 4000\ \text{V}]$  im Abstand von 100 V aufgenommen. Die Messdauer beträgt pro Messpunkt 50 s, auf die eine Tot-Zeit von 15 s folgt, damit sich die Spannung einstellen kann.

Als Nächstes wird  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  untersucht, welches in Pulver-Form vorliegt. Zunächst wird der Durchmesser des Al-Schälchens, in dem die Probe in das Zählrohr geschoben wird, mit einem Messschieber mehrfach bestimmt. Das Al-Schälchen wird möglichst flächendeckend mit dem Pulver befüllt, da für die Messungen die Oberfläche der Probe relevant ist. Damit die Apparatur nicht kontaminiert wird, ist es wichtig, beim Wechsel der Probe die Gaszufuhr zu unterbrechen.

Das  $\alpha$ -Plateau von  $^{147}\text{Sm}$  wird gemessen. Dabei werden Start- und Endspannung aus der Zählrohrcharakteristik von  $^{238}\text{U}$  abgeschätzt. Da die erste Messung mit einer Startspannung von 1600 V und einer Endspannung von 3200 V kein zufriedenstellendes Plateau liefert, wird die Messung im Bereich  $[1800\ \text{V}, 3700\ \text{V}]$  im Abstand von 100 V und einer Messdauer von 200 s wiederholt. Die Mitte des Plateaus liegt bei etwa 2400 V. Mit dieser Spannung wird eine Messung mit einer Dauer von 5000 s durchgeführt, um die Aktivität von  $^{147}\text{Sm}$  zu bestimmen.

Als Nächstes wird die Probe KCl untersucht, welches ebenfalls pulvrig zur Verfügung steht. Hier wird das  $\beta$ -Plateau von  $^{40}\text{K}$  gemessen. Dabei wird der Bereich  $[3000\ \text{V}, 4000\ \text{V}]$  in 100 V Schritten mit Messdauern von 100 s untersucht. Die Mitte des Plateaus wird auf 3500 V abgeschätzt. Für die Messung wird ein Zeitintervall von 600 s gewählt. Mit diesen Einstellungen werden 2 Messungen mit unterschiedlichen Massen der Probe durchgeführt. Diese werden mit einer Präzisionswaage bestimmt, welche jeweils auf die leeren, unterschiedlich großen Al-Schälchen tariert werden.

Damit bei der Untergrundmessung genug Rauschen detektiert wird, wird diese über Nacht durchgeführt. Dafür wird ein leeres Al-Schälchen im Bereich  $[1300\ \text{V}, 4000\ \text{V}]$  im Abstand von 100 V und Messdauern von 2000 s gemessen.

Danach werden 9 weitere Messungen mit unterschiedlichen Massen von KCl durchgeführt.

## 4. Auswertung

### 4.1. Untergrund

Bei der Untergrundmessung ist der Bereich  $U = [1300 \text{ V}, 4000 \text{ V}]$  im Abstand  $\Delta U = 100 \text{ V}$  mit jeweiliger Messdauer  $\Delta t = 2000 \text{ s}$  gemessen worden. Der Fehler auf die Zählraten  $n_{Ug}$  wird durch

$$s_{n_{Ug}} = \frac{n_{Ug}}{\sqrt{n_{Ug} \cdot \Delta t}} = \sqrt{\frac{n_{Ug}}{\Delta t}} \quad (4.1)$$

ermittelt. Die Messung ist in Abbildung 4.1 aufgetragen.

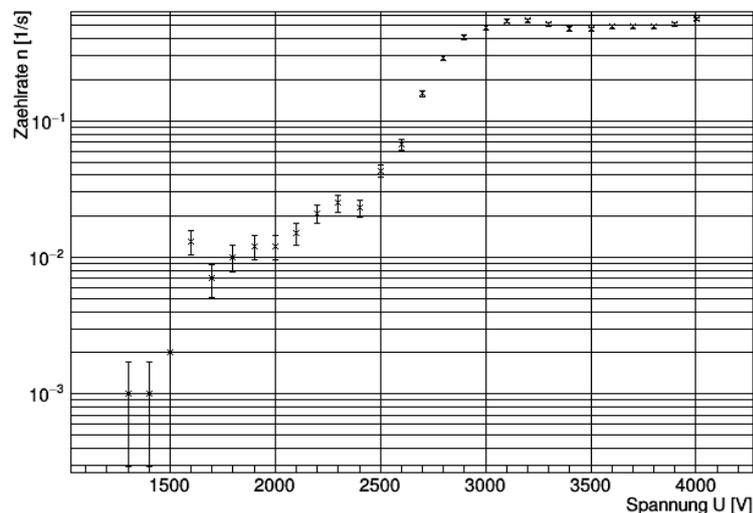


Abbildung 4.1.: Untergrundmessung mit  $\Delta t = 2000 \text{ s}$

Die hier festgestellten Werte werden von den anderen Messungen abgezogen, wodurch aus den gemessenen Zählraten reduzierte Zählraten werden.

### 4.2. Zählrohrcharakteristik $^{238}\text{U}$

Um das  $\alpha$ - und das  $\beta$ -Plateau zu finden, ist die Zählrohrcharakteristik von  $^{238}\text{U}$  in einem Bereich von  $U = [1000 \text{ s}, 4000 \text{ s}]$  im Abstand  $\Delta U = 100 \text{ V}$  aufgenommen worden. In der Grafik 4.2 kann man erkennen, dass das  $\alpha$ -Plateau des Zählrohrs bei  $\approx 1600 \text{ Volt}$  und das  $\beta$ -Plateau bei  $\approx 3000 \text{ Volt}$  anfängt. Das Ende des  $\alpha$ -Plateaus ist nicht zu erkennen, da das Ende vom  $\beta$ -Plateau überlagert wird. In Grafik 4.2 ist die Untergrundmessung bereits von den gemessenen Werten abgezogen<sup>1</sup>, sodass die reduzierte Zählrate  $n_{Ur}$  aufgetragen wird. Der Fehler auf die Zählraten bei Uran  $s_{Ur}$  berechnet sich wie in (4.1). Die Fehler auf die reduzierten Zählraten berechnen sich durch Fehlerfortpflanzung mit

$$s_{char,Ug} = \sqrt{s_{Ug}^2 + s_{Ur}^2} \quad (4.2)$$

<sup>1</sup>Für  $U = 1.3 \text{ kV}$  sind keine Untergrundmessungen vorhanden, aber in Abbildung 4.1 ist zu sehen, dass dieser für geringere Spannungen vernachlässigbar klein wird.

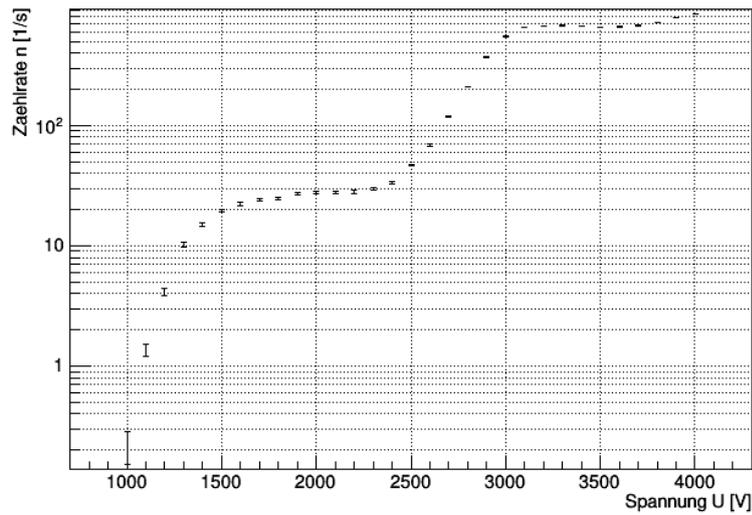


Abbildung 4.2.: Zählrohrcharakteristik  $^{238}\text{U}$  mit  $\Delta t = 2000 \text{ s}$

### 4.3. Zählrohrcharakteristik $^{147}\text{Sm}$

Mithilfe der Zählrohrcharakteristik von  $^{238}\text{U}$  wird der Bereich für die Zählrohrcharakteristik von  $^{147}\text{Sm}$  abgeschätzt. Wie dort bereits beschrieben, ist das  $\alpha$ -Plateau ab  $\approx 1600 \text{ V}$  zu erwarten. Ab dieser Spannung wird die erste Zählrohrcharakteristik (s. Abbildung A.1) aufgenommen, bei der sich zeigt, dass das Plateau erst bei höheren Spannungen anfängt. Um nochmals eine neue Referenz für den Mittelpunkt des Plateaus zu bekommen, wurde ein Bereich von  $U = [1800 \text{ V}, 3700 \text{ V}]$  im Abstand  $\Delta U = 100 \text{ V}$  und einer Einzelmessdauer von  $\Delta t = 200 \text{ s}$  durchgeführt, bei der in Abbildung 4.3 die reduzierten Zährraten mit demselben Fehler wie in (4.2) aufgetragen sind.

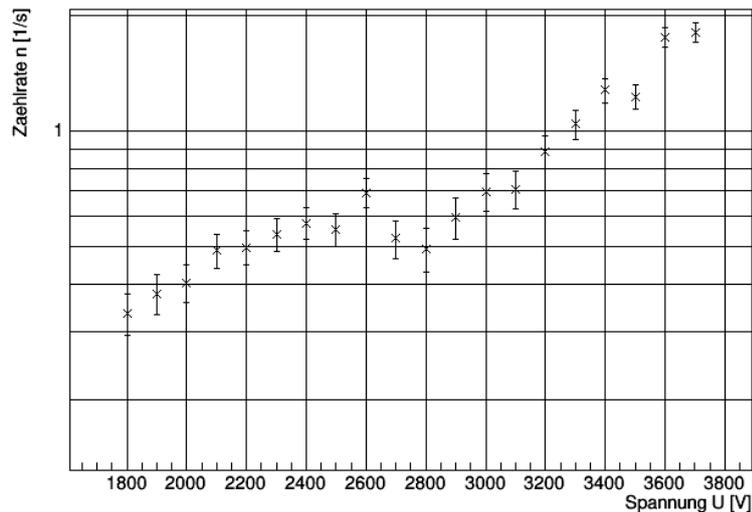


Abbildung 4.3.: Zählrohrcharakteristik  $^{147}\text{Sm}$

Das Plateau ist hier zwischen  $2000 \text{ V}$  und  $2800 \text{ V}$  angesetzt, also wird für die Messung der Halbwertszeit von  $^{147}\text{Sm}$  eine Spannung von  $2400 \text{ V}$  gewählt, bei der eine reduzierte Zährrate von  $n_{^{147}\text{Sm},r}(2.4 \text{ kV}) = (0.58 \pm 0.05) \text{ s}^{-1}$  gemessen wurde.

## 4.4. Halbwertszeit von $^{147}\text{Sm}$

Da ein relativer Fehler von 2% empfohlen wird, wird mit der gemessenen reduzierten Zählrate von  $n_{^{147}\text{Sm},r} = 0.58 \text{ s}^{-1}$  die Messdauer durch

$$\frac{1}{\sqrt{n_{^{147}\text{Sm},r} \cdot \Delta t}} \stackrel{!}{=} 0.02 \quad (4.3)$$

$$\Leftrightarrow \Delta t = \frac{1}{0.58 \cdot 0.02^2} \text{ s} = 4300 \text{ s} \quad (4.4)$$

zunächst abgeschätzt und eine Messdauer von  $\Delta t = 5000 \text{ s}$  gewählt, damit die Bedingung sicher erfüllt ist. Dies liefert

$$n_{^{147}\text{Sm},r}(U = 2400 \text{ V}) = (0.590 \pm 0.012) \text{ s}^{-1} \quad (4.5)$$

als reduzierte Zählrate. Um die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  nach (1.14) zu ermitteln, wird der Durchmesser des Al-Schälchens fünf Mal vermessen, um die Oberfläche  $F$  zu erhalten. Die ermittelten Durchmesser sind in Tabelle 4.1 zu sehen. Als Fehler auf den Mittelwert wird die statistische Schwankung verwendet, da sie höher als der Fehler auf den Mittelwert bei fünf Einzelmessungen ist.

Tabelle 4.1.: Ermittelte Durchmesser und gemittelter Radius des verwendeten Al-Schälchens

$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$r$
2.900 cm	2.905 cm	2.880 cm	2.905 cm	2.880 cm	$(1.447 \pm 0.003) \text{ cm}$

Damit ergibt sich die Fläche zu

$$s_F = F \cdot \frac{2 \cdot s_r}{r} \quad (4.6)$$

$$F = \pi r^2 = (6.58 \pm 0.03) \text{ cm}^2 \quad (4.7)$$

Als letztes muss der unbekannte Faktor  $R_{\text{Sm}_2\text{O}_3} \cdot \rho_{\text{Sm}_2\text{O}_3}$  ermittelt werden. Hier wird nun die Näherung von Bragg und Cleeman für  $R \cdot \rho$  angewandt:

$$R \cdot \rho = \text{const} \sqrt{m_A} \quad (4.8)$$

$$\sqrt{m_A} = \sum_i p_i \cdot \sqrt{m_{A_i}} \quad (4.9)$$

$$R_{\text{Sm}_2\text{O}_3} \cdot \rho_{\text{Sm}_2\text{O}_3} = R_{\text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot \sqrt{\frac{m_{A,\text{Sm}_2\text{O}_3}}{m_{A,\text{Luft}}}} \quad (4.10)$$

wobei  $m_A$  das effektive Molekulgewicht und  $m_{A_i}$  das effektive Atomgewicht der Elemente ist.  $p_i$  ist der relative Häufigkeit des Elements in der Substanz. Die Konstanten von Luft sind nach [VER, S. 4]

$$R_{\text{Luft}} = 1.13 \text{ cm} \quad (4.11)$$

$$\rho_{\text{Luft}} = 0.001226 \text{ g cm}^{-3} \quad (4.12)$$

$$p_{\text{N,Luft}} = 0.75518 \quad (4.13)$$

$$p_{\text{O,Luft}} = 0.23135 \quad (4.14)$$

$$p_{\text{Ar,Luft}} = 0.01288 \quad (4.15)$$

bekannt. Damit und mit

$$m_{\text{Sm}} = 150.36 \text{ u} \quad (4.16)$$

$$m_{\text{O}} = 15.999 \text{ u} \quad (4.17)$$

$$m_{\text{N}} = 14.0067 \text{ u} \quad (4.18)$$

$$m_{\text{Ar}} = 39.948 \text{ u} \quad (4.19)$$

ergibt sich

$$R_{\text{Sm}_2\text{O}_3} \cdot \rho_{\text{Sm}_2\text{O}_3} = 4.026 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-2} \quad (4.20)$$

Mit den Konstanten  $h_{\text{Sm}_2\text{O}_3} = 14.87\%^2$ ,  $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  und  $M_{\text{Sm}_2\text{O}_3} = 348.72 \text{ g mol}^{-1}$  folgt damit eine Halbwertszeit nach (1.14) von

$$s_{T_{1/2}} = T_{1/2} \cdot \sqrt{\left(\frac{s_F}{F}\right)^2 + \left(\frac{s_{n_{147\text{Sm},r}}}{n_{147\text{Sm},r}}\right)^2} \quad (4.21)$$

$$T_{1/2} = (1.27 \pm 0.03) \times 10^{11} \text{ a} \quad (4.22)$$

## 4.5. Zählrohrcharakteristik $^{40}\text{K}$

Bei  $^{40}\text{K}$  wird das  $\beta$ -Plateau, weshalb eine Zählrohrcharakteristik im Bereich  $U = [3000 \text{ V}, 4000 \text{ V}]$  im Abstand  $\Delta U = 100 \text{ V}$  und Messdauern von  $\Delta t = 100 \text{ s}$  durchgeführt wird. Die reduzierte Zählrate wird in Abbildung 4.4 aufgetragen.

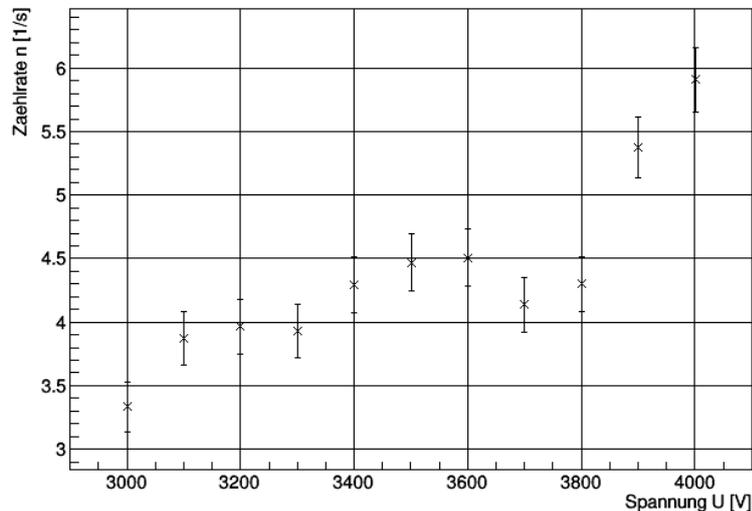


Abbildung 4.4.: Zählrohrcharakteristik  $^{40}\text{K}$

Das  $\beta$ -Plateau wurde auf  $U = [3200 \text{ V}, 3800 \text{ V}]$  abgeschätzt, weshalb die weiteren Messungen bei  $U = 3500 \text{ V}$  durchgeführt wurden, wobei die reduzierte Zählrate hier  $n_{40\text{K},r}(3.5 \text{ kV}) = (4.5 \pm 0.2) \text{ s}^{-1}$  betrug.

<sup>2</sup> [VER, S .11]

<sup>3</sup>[https://de.wikipedia.org/wiki/Samarium\(III\)-oxid](https://de.wikipedia.org/wiki/Samarium(III)-oxid), abgerufen am 04.09.17, 16:25Uhr

## 4.6. Halbwertszeit von $^{40}\text{K}$

Für elf unterschiedliche Massen wird die Zählrate aufgenommen (s. Tabelle B.4). An diese Messdaten wird eine Anpassung einer Funktion der Form

$$f(x) = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x)) \quad (4.23)$$

durchgeführt, welche in Abbildung 4.5 zu sehen ist. Die Form resultiert aus (1.21). Die Fitparameter entsprechen

$$a = f_B \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \frac{A_S \cdot F \cdot \rho_{\text{KCl}}}{\mu_{\text{KCl}}} \quad (4.24)$$

$$b = \frac{\mu_{\text{KCl}} \cdot m_{\text{KCl}}}{F \cdot \rho_{\text{KCl}}} \quad (4.25)$$

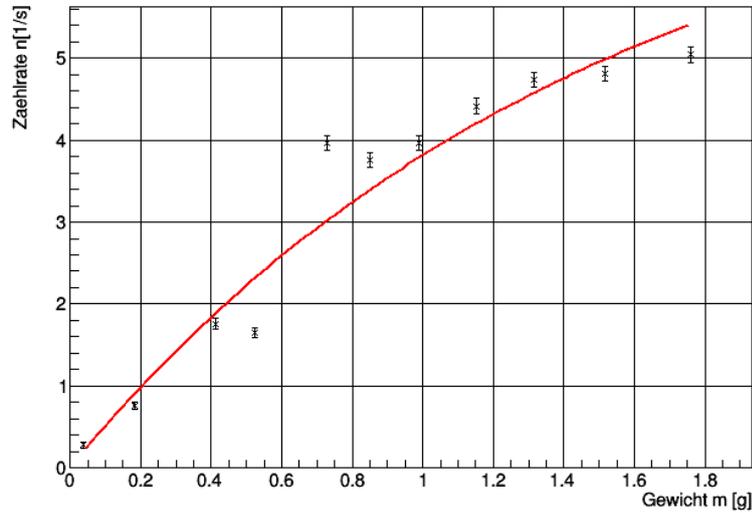


Abbildung 4.5.: Diagramm der Messreihen von  $^{40}\text{K}$  inklusive Fit

Der Fit liefert die Parameter

$$a = (7.81 \pm 0.34) \text{ s}^{-1} \quad (4.26)$$

$$b = (0.671 \pm 0.043) \text{ g}^{-1} \quad (4.27)$$

$$\chi/\text{DoF} = 33.4 \quad (4.28)$$

$$\text{KovMatrix} = \begin{pmatrix} 0.113 & -0.014 \\ -0.014 & 0.002 \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

Mithilfe der Ableitung des Fits und (1.21) findet sich

$$\left. \frac{dn}{dm} \right|_{m=0} = a \cdot b = \frac{f_B \cdot \Omega \cdot A_S}{4\pi} \quad (4.30)$$

$$\stackrel{f_B=1.29}{\Leftrightarrow} \stackrel{\Omega=2\pi}{A_S} A_S = \frac{2 \cdot a \cdot b}{1.29} \quad (4.31)$$

$$\Rightarrow s_{A_S} = A_S \cdot \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \frac{2 \cdot \text{cov}(a, b)}{a \cdot b}} \quad (4.32)$$

$$\Rightarrow A_S = (8.1 \pm 0.2) \text{ s}^{-1} \text{ g}^{-1} \quad (4.33)$$

wobei sich  $A_S$  auf die Masse der KCl bezieht. Durch die Relation

$$N_{\text{KCl}} = N_A \cdot \frac{m_{\text{KCl}}}{M_{\text{KCl}}} = N_{\text{K}} \quad (4.34)$$

$$\Rightarrow N_{^{40}\text{K}} = h_{rel,^{40}\text{K}} \cdot N_A \cdot \frac{m_{\text{KCl}}}{M_{\text{KCl}}} \quad (4.35)$$

folgt aus (1.5)

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}(\beta^-)} \cdot N_{^{40}\text{K}} \quad (4.36)$$

$$\Leftrightarrow T_{1/2}(\beta^-) = \frac{\ln 2}{A} \cdot N_{^{40}\text{K}} = \ln 2 \cdot \frac{h_{rel,^{40}\text{K}} \cdot N_A}{A_S \cdot M_{\text{KCl}}} \quad (4.37)$$

womit sich die Halbwertszeit von  $^{40}\text{K}$  unter Verwendung von (1.17) zu

$$T_{1/2}(^{40}\text{K}) = \frac{T_{1/2}(\beta^-)}{1.12} = \frac{\ln 2}{A} \cdot N_{^{40}\text{K}} = \frac{\ln 2 \cdot h_{rel,^{40}\text{K}} \cdot N_A}{1.12 \cdot A_S \cdot M_{\text{KCl}}} \quad (4.38)$$

$$\Rightarrow s_{T_{1/2}} = T_{1/2} \cdot \frac{s_{A_S}}{A_S} \quad (4.39)$$

$$\Rightarrow T_{1/2}(^{40}\text{K}) = (2.29 \pm 0.06) \times 10^9 \text{a} \quad (4.40)$$

wobei  $h_{rel,^{40}\text{K}} = 0.0118\%^4$  und  $M_{\text{KCl}} = 74.55 \text{ g mol}^{-15}$ , ergibt.

---

<sup>4</sup> [VER, S. 11]

<sup>5</sup>[https://de.wikipedia.org/wiki/Samarium\(III\)-oxid](https://de.wikipedia.org/wiki/Samarium(III)-oxid), abgerufen am 04.09.17, 16:25Uhr

## 5. Fehlerdiskussion

### 5.1. $^{147}\text{Sm}$

Bei dieser Messung ist eine mögliche Fehlerursache, dass die Al-Schälchen nicht komplett flächendeckend gefüllt waren, wodurch sich eine höhere Halbwertszeit ergibt. Des Weiteren war als Vorgabe gegeben, dass ein Druck von etwa 0.3 bar verwendet werden sollte, wir verwendeten jedoch einen Druck von mindestens 0.35 bar (siehe Versuchsdurchführung), wodurch möglicherweise die Zählrate zurückging, da die Ionen zu einer geringen Rate von den Methan-Atomen „weggespült“ wurden, wodurch die Gasverstärkung reduziert wird. Außerdem konnten leichte Verunreinigungen im  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  beobachtet werden, welche die Masse leicht erhöht haben, wodurch die Halbwertszeit verlängert wurde. Als letzte und größte Fehlerquelle ist wohl eine zu niedrige Integrationszeit zu benennen, da dadurch die Zählrate, welche sowieso schon gering ausfällt, stark geschwächt werden kann, wodurch die Abweichung von  $7\sigma$  erklärt werden kann.

### 5.2. $^{40}\text{K}$

Bei der Halbwertszeit von  $^{40}\text{K}$  fand sich ein Wert von  $T_{1/2} = (2.29 \pm 0.06) \times 10^9 \text{a}$ , der sich von dem Nennwert  $T_{1/2,N} = 1.28 \times 10^9 \text{a}$  ([VER, S. 11]) um  $17\sigma$  unterscheidet. Diese extreme Diskrepanz kann teilweise behoben werden, indem die Messungen mit einer Masse des KCl von unter 0.6 g aus dem Fit herausgenommen werden. Die Rechtfertigung dahinter liegt dabei, dass, aufgrund der recht niedrigen Integrationszeit, Messungen, bei denen sehr kleine Zählraten erwartet werden, extrem wenige Zerfälle registriert werden, die das Ergebnis sehr stark beeinflussen. Ohne diese Messwerte ergibt sich aus dem Fit, der in Abbildung 5.1 zu sehen ist

$$a = (5.3 \pm 0.1) \text{s}^{-1} \quad (5.1)$$

$$b = (1.6 \pm 0.1) \text{g}^{-1} \text{s}^{-1} \quad (5.2)$$

$$\chi/\text{DoF} = 5.5 \quad (5.3)$$

$$\text{KovMatrix} = \begin{pmatrix} 0.018 & -0.014 \\ -0.014 & 0.013 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

und somit

$$T_{1/2} = (1.42 \pm 0.04) \times 10^9 \text{a} \quad (5.5)$$

was „nur“ noch  $4\sigma$  vom Nennwert entfernt ist. Weiterhin sind die Druck und Verunreinigungs-Fehler auch hier vorhanden. Mit diesen systematischen Fehler liegt der gemessene Wert im akzeptablen Bereich.

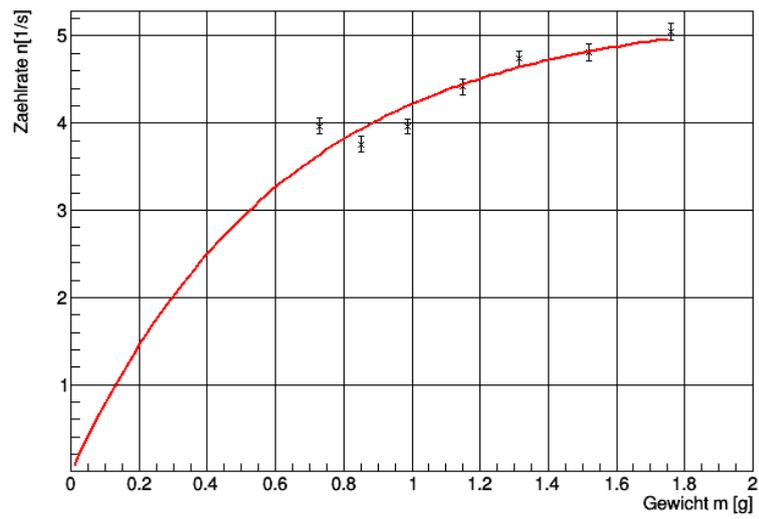


Abbildung 5.1.: Diagramm der Messreihen von  $^{40}\text{K}$  ohne die ersten 3 Punkte

## 6. Zusammenfassung

In diesem Versuch wurden lange Halbwertszeiten von über  $10^9$  Jahren untersucht. Mithilfe von  $^{238}\text{U}$  wurden die Bereiche des  $\alpha$ - und des  $\beta$ -Plateaus abgeschätzt und durch eine erneute Zählrohrcharakteristik von  $^{147}\text{Sm}$  (für  $\alpha$ ) und  $^{40}\text{K}$  (für  $\beta$ ) überprüft. Mithilfe des Wissens der Mitte der jeweiligen Plateaus und des gemessenen Untergrundes bei den zugehörigen Spannungen wurden dann die Messungen der Halbwertszeit durchgeführt.

Bei  $^{147}\text{Sm}$  wurde eine Halbwertszeit von  $T_{1/2}(^{147}\text{Sm}) = (1.27 \pm 0.03) \times 10^{11}\text{a}$  ermittelt. Der Nennwert liegt mit  $T_{1/2,N}(^{147}\text{Sm}) = 1.06\text{a}$  erst im  $7\sigma$ -Bereichs des Messwertes. Da damit statistische Schwankungen ausgeschlossen sind, sind andere Fehlereinflüsse in Kapitel 6 besprochen worden. Dabei ist als wahrscheinlichste Ursache der krassen Abweichung genannt worden, dass die Integrationszeit zu niedrig eingestellt war und damit auch die Zählrate zu gering ausfiel.

Bei  $^{40}\text{K}$  wurde eine Halbwertszeit von  $T_{1/2}(^{40}\text{K}) = (2.29 \pm 0.06) \times 10^9\text{a}$  bei einem Nennwert von  $T_{1/2,N}(^{40}\text{K}) = 1.28 \times 10^9\text{a}$  gemessen, wodurch der Nennwert erst im  $17\sigma$ -Bereich liegt. Scheinbar hatte diese extreme Abweichung etwas mit den Messungen der Halbwertszeit bei geringen Massen zu tun, da ignorieren der Messwerte mit einer Masse unter  $0.6\text{g}$  dazu führten, dass sich die Halbwertszeit zu  $T_{1/2}(^{40}\text{K}) = (1.42 \pm 0.04) \times 10^9\text{a}$  änderte, wodurch der Nennwert nur noch im  $4\sigma$ -Bereich lag! Mit den anderen genannten, in den Messwert nicht mit einbezogenen, Fehlern ist dieser Wert in einem akzeptablen Bereich. Das stützt auch die Annahme, dass das Ergebnis bei  $^{147}\text{Sm}$  so schlecht ausfiel, da die Zählraten dort ebenfalls nicht so hoch sind.

In dieser Versuchsdurchführung wiesen die Messergebnisse eine hohe Diskrepanz zu den Messwerten auf. Allerdings kann das wohl eher auf falsche Einstellungen an den Geräten zurückgeführt werden. Mit einer größeren Integrationszeit, etwas weniger Gasdruck und reinerem Material wären die Ergebnisse sicherlich besser ausgefallen.

# Literaturverzeichnis

[KOT] KOTYK, TOBIJAS, *Versuche zur Radioaktivität im Physikalischen Fortgeschrittenen Praktikum*, Wissenschaftliche Arbeit für die Zulassung zur Prüfung für das Lehramt Gymnasium. Universität Freiburg, November 2005.

[VER] *Versuchsanleitung, Fortgeschrittenen Praktikum Teil 1, Lange Halbwertszeiten*, Universität Freiburg, 26. Juni 2012.

# A. Diagramme

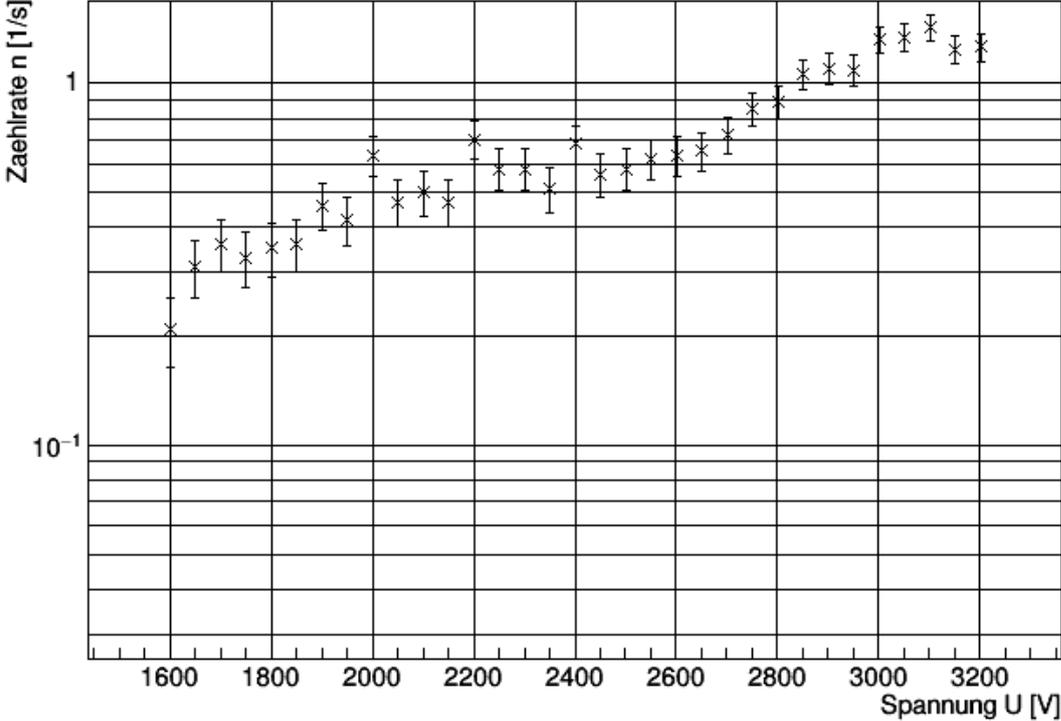


Abbildung A.1.: Zählrohrcharakteristik <sup>147</sup>Sm, erste Messung

## B. Tabellen

Tabelle B.1.: Messdaten zu Abbildung 4.1

U	n
$1.3 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.001\,00 \pm 0.000\,71) \text{ s}^{-1}$
$1.4 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.001\,00 \pm 0.000\,71) \text{ s}^{-1}$
$1.5 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.002 \pm 0.001) \text{ s}^{-1}$
$1.6 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0130 \pm 0.0025) \text{ s}^{-1}$
$1.7 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0070 \pm 0.0019) \text{ s}^{-1}$
$1.8 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0100 \pm 0.0022) \text{ s}^{-1}$
$1.9 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0120 \pm 0.0024) \text{ s}^{-1}$
$2 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0120 \pm 0.0024) \text{ s}^{-1}$
$2.1 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0150 \pm 0.0027) \text{ s}^{-1}$
$2.2 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0210 \pm 0.0032) \text{ s}^{-1}$
$2.3 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0250 \pm 0.0035) \text{ s}^{-1}$
$2.4 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0230 \pm 0.0034) \text{ s}^{-1}$
$2.5 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0430 \pm 0.0046) \text{ s}^{-1}$
$2.6 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.0670 \pm 0.0058) \text{ s}^{-1}$
$2.7 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.1600 \pm 0.0089) \text{ s}^{-1}$
$2.8 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.290 \pm 0.012) \text{ s}^{-1}$
$2.9 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.410 \pm 0.014) \text{ s}^{-1}$
$3 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.480 \pm 0.016) \text{ s}^{-1}$
$3.1 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.540 \pm 0.016) \text{ s}^{-1}$
$3.2 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.550 \pm 0.017) \text{ s}^{-1}$
$3.3 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.510 \pm 0.016) \text{ s}^{-1}$
$3.4 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.470 \pm 0.015) \text{ s}^{-1}$
$3.5 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.470 \pm 0.015) \text{ s}^{-1}$
$3.6 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.490 \pm 0.016) \text{ s}^{-1}$
$3.7 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.490 \pm 0.016) \text{ s}^{-1}$
$3.8 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.490 \pm 0.016) \text{ s}^{-1}$
$3.9 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.510 \pm 0.016) \text{ s}^{-1}$
$4 \times 10^3 \text{ V}$	$(0.560 \pm 0.017) \text{ s}^{-1}$

Tabelle B.2.: Messdaten zu Abbildung 4.2

U	n
1000.0 V	$(0.220 \pm 0.066) \text{ s}^{-1}$
1100.0 V	$(1.36 \pm 0.16) \text{ s}^{-1}$
1200.0 V	$(4.12 \pm 0.29) \text{ s}^{-1}$
1300.0 V	$(10.18 \pm 0.45) \text{ s}^{-1}$
1400.0 V	$(14.96 \pm 0.55) \text{ s}^{-1}$
1500.0 V	$(19.54 \pm 0.63) \text{ s}^{-1}$
1600.0 V	$(22.35 \pm 0.67) \text{ s}^{-1}$
1700.0 V	$(24.07 \pm 0.69) \text{ s}^{-1}$
1800.0 V	$(24.61 \pm 0.70) \text{ s}^{-1}$
1900.0 V	$(27.23 \pm 0.74) \text{ s}^{-1}$
2000.0 V	$(27.77 \pm 0.75) \text{ s}^{-1}$
2100.0 V	$(27.68 \pm 0.74) \text{ s}^{-1}$
2200.0 V	$(28.16 \pm 0.75) \text{ s}^{-1}$
2300.0 V	$(29.50 \pm 0.77) \text{ s}^{-1}$
2400.0 V	$(33.60 \pm 0.82) \text{ s}^{-1}$
2500.0 V	$(46.68 \pm 0.97) \text{ s}^{-1}$
2600.0 V	$(68.29 \pm 1.20) \text{ s}^{-1}$
2700.0 V	$(117.7 \pm 1.5) \text{ s}^{-1}$
2800.0 V	$(209.1 \pm 2.0) \text{ s}^{-1}$
2900.0 V	$(369.8 \pm 2.7) \text{ s}^{-1}$
3000.0 V	$(549.3 \pm 3.3) \text{ s}^{-1}$
3100.0 V	$(654.1 \pm 3.6) \text{ s}^{-1}$
3200.0 V	$(671.7 \pm 3.7) \text{ s}^{-1}$
3300.0 V	$(676.5 \pm 3.7) \text{ s}^{-1}$
3400.0 V	$(672.5 \pm 3.7) \text{ s}^{-1}$
3500.0 V	$(657.1 \pm 3.6) \text{ s}^{-1}$
3600.0 V	$(661.0 \pm 3.6) \text{ s}^{-1}$
3700.0 V	$(677.1 \pm 3.7) \text{ s}^{-1}$
3800.0 V	$(713.5 \pm 3.8) \text{ s}^{-1}$
3900.0 V	$(783.5 \pm 4.0) \text{ s}^{-1}$
4000.0 V	$(840.8 \pm 4.1) \text{ s}^{-1}$

Tabelle B.3.: Messdaten zu Abbildung 4.3

U	n
1800.0 V	$(0.330 \pm 0.042) \text{ s}^{-1}$
1900.0 V	$(0.380 \pm 0.044) \text{ s}^{-1}$
2000.0 V	$(0.400 \pm 0.046) \text{ s}^{-1}$
2100.0 V	$(0.49 \pm 0.05) \text{ s}^{-1}$
2200.0 V	$(0.500 \pm 0.051) \text{ s}^{-1}$
2300.0 V	$(0.540 \pm 0.053) \text{ s}^{-1}$
2400.0 V	$(0.580 \pm 0.055) \text{ s}^{-1}$
2500.0 V	$(0.560 \pm 0.055) \text{ s}^{-1}$
2600.0 V	$(0.690 \pm 0.062) \text{ s}^{-1}$
2700.0 V	$(0.530 \pm 0.059) \text{ s}^{-1}$
2800.0 V	$(0.490 \pm 0.064) \text{ s}^{-1}$
2900.0 V	$(0.600 \pm 0.072) \text{ s}^{-1}$
3000.0 V	$(0.700 \pm 0.078) \text{ s}^{-1}$
3100.0 V	$(0.710 \pm 0.081) \text{ s}^{-1}$
3200.0 V	$(0.890 \pm 0.086) \text{ s}^{-1}$
3300.0 V	$(1.0 \pm 0.9) \text{ s}^{-1}$
3400.0 V	$(1.300 \pm 0.095) \text{ s}^{-1}$
3500.0 V	$(1.200 \pm 0.094) \text{ s}^{-1}$
3600.0 V	$(1.80 \pm 0.11) \text{ s}^{-1}$
3700.0 V	$(1.80 \pm 0.11) \text{ s}^{-1}$

Tabelle B.4.: Messdaten zu Abbildung 5.1

n	m
$(4.0 \pm 0.5) \text{ s}^{-1}$	$(987.80 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(1.6 \pm 0.4) \text{ s}^{-1}$	$(522.70 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(0.76 \pm 0.30) \text{ s}^{-1}$	$(182.00 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(1.8 \pm 0.4) \text{ s}^{-1}$	$(412.30 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(5.0 \pm 0.6) \text{ s}^{-1}$	$(1760.50 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(4.7 \pm 0.6) \text{ s}^{-1}$	$(1314.80 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(4.0 \pm 0.5) \text{ s}^{-1}$	$(727.90 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(0.28 \pm 0.20) \text{ s}^{-1}$	$(37.80 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(4.8 \pm 0.6) \text{ s}^{-1}$	$(1517.40 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(4.4 \pm 0.5) \text{ s}^{-1}$	$(1150.60 \pm 0.06) \text{ mg}$
$(3.8 \pm 0.5) \text{ s}^{-1}$	$(851.30 \pm 0.06) \text{ mg}$

Tabelle B.5.: Messdaten zu Abbildung 4.4

U	n
3000.0 V	$(3.3 \pm 0.2) \text{ s}^{-1}$
3100.0 V	$(3.90 \pm 0.21) \text{ s}^{-1}$
3200.0 V	$(4.00 \pm 0.21) \text{ s}^{-1}$
3300.0 V	$(3.90 \pm 0.21) \text{ s}^{-1}$
3400.0 V	$(4.30 \pm 0.22) \text{ s}^{-1}$
3500.0 V	$(4.50 \pm 0.22) \text{ s}^{-1}$
3600.0 V	$(4.50 \pm 0.22) \text{ s}^{-1}$
3700.0 V	$(4.10 \pm 0.22) \text{ s}^{-1}$
3800.0 V	$(4.30 \pm 0.22) \text{ s}^{-1}$
3900.0 V	$(5.40 \pm 0.24) \text{ s}^{-1}$
4000.0 V	$(5.90 \pm 0.25) \text{ s}^{-1}$

LHUT:

Uran A: Verstärkung: 20  
Lower level: 0,5  
Shipping time: 2 ps

Druck: zwischen 0,36 bar and 0,39 bar

~~147 Sm: m = 1,9985 g (m = m<sub>Al</sub> + m<sub>Sm</sub>)~~

Durchmesser Alu 1 Sm<sup>197</sup> = D1 = 2,900 cm  
D2 = 2,905 cm  
D3 = 2,980 cm  
D4 = 2,905 cm  
D5 = 2,950 cm  
Fehler auf der Durchmesser: 0,005 cm

B-Plateau:

Max K<sub>40</sub>: Max Alu 1 leer: 1,1779 g  
voll: 0,9878 g

Messung w<sub>ok</sub>: K401: Alu 1, voll: 0,9878 g, t = 600 s, U = 3500 V  
K402: Alu 1, voll: 0,5227 g, t = 600 s, U = 3500 V

leer: 4,1980 g

K403: voll: 0,1120 g

K404: voll: 0,4123 g

K405: voll: 1,7605 g

K406: voll: 1,3148 g

K407: voll: 0,7275 g

K408: voll: 0,0378 g

K409: voll: 1,5174g

~~K4010~~: voll: 1,1520g

K4010: voll: 1,1506g

K5011: voll: 0,8513g

Fehler auf die Massen: 0,0001g

Untergrund:  $A_{u1}$ ,  $\Delta t = 2000s$ ,  $A_U = 100V$ ,  $U_{init} = 100V$

$U_{end} = 4000V$