

Versuch 702

## Aktivierung mit Neutronen

Stefanie Hilgers  
Stefanie.Hilgers@tu-dortmund.de

Lara Nollen  
Lara.Nollen@tu-dortmund.de

Durchführung: 05.06.2018

Abgabe: 12.06.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>11</b>
	<b>Literatur</b>	<b>12</b>

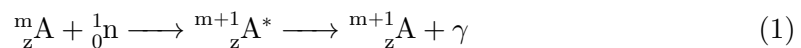
## 1 Zielsetzung

Bei diesem Versuch soll die Halbwertszeit zweier verschiedener Elemente mittels Aktivierung mit Neutronen untersucht werden.

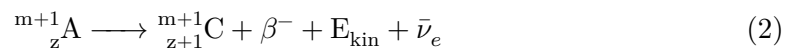
## 2 Theorie

Der Zerfall radioaktiver Isotope beruht darauf, dass das Verhältniss von Neutronen und Protonen außerhalb eines bestimmten Bereiches liegt und die Kerne somit instabil werden. Die Halbwertszeiten  $T$ , also die Zeiten, in denen etwa die Hälfte der Kerne des vorliegenden Materials zerfallen sind, liegt bei den hier verwendeten Isotopen im Bereich von einigen Sekunden bis Stunden. Daher müssen die instabilen Isotope, welche untersucht werden sollen, erst kurz vor dem Versuch erzeugt werden.

Zu diesem Zweck werden stabile Kerne mit freien Neutronen bestrahlt, welche aufgrund der neutralen Ladung die Coulomb-Barriere nicht überwinden müssen und somit leichter in den Kern eindringen können. Gelangt ein Neutron in einen Kern A, so entsteht zunächst ein sogenannter Zwischenkern oder auch Compoundkern  $A^*$ , welcher aufgrund der kinetischen Energie und der Bindungsenergie des Neutrons energetisch höher liegt als der Kern A. Die zusätzliche Energie wird allerdings sehr schnell auf alle Nukleonen verteilt, sodass das Neutron nicht direkt wieder abgestrahlt werden kann. Stattdessen geht der Compoundkern unter Emission eines  $\gamma$ -Quants nach etwa  $10^{-16}$ s in seinen Grundzustand über, sodass insgesamt die Reaktion



abläuft. Da nun bei dem neu entstandenen Kern das Verhältniss von Protonen und Neutronen außerhalb des stabilen Bereichs liegt, ist der so entstandene Kern instabil. Er wandelt sich durch einen  $\beta$ -Zerfall, also unter Emission eines Elektrons und eines Antineutrinos in einen neuen stabilen Kern C um. Die Reaktionsgleichung lautet:



Um die Wahrscheinlichkeit eines Neutroneneinfangs anzugeben wird der Wirkungsquerschnitt mit der Gleichung

$$\sigma = \frac{u}{nKd} \quad (3)$$

eingeführt, welcher so definiert ist, dass bei einem Beschuss von  $n$  Neutronen pro Sekunde auf eine dünne Folie mit Dicke  $d$  und  $K$  Atomen pro Kubikcentimeter  $u$  Einfänge stattfinden. Somit ist die Einheit des Wirkungsquerschnitt durch  $10^{-24}\text{cm}^2 =: 1\text{barn}$  gegeben.

Hierbei ist der Wirkungsquerschnitt antiproportional zur Geschwindigkeit der Neutronen, es gilt also

$$\sigma \propto \frac{1}{v}. \quad (4)$$

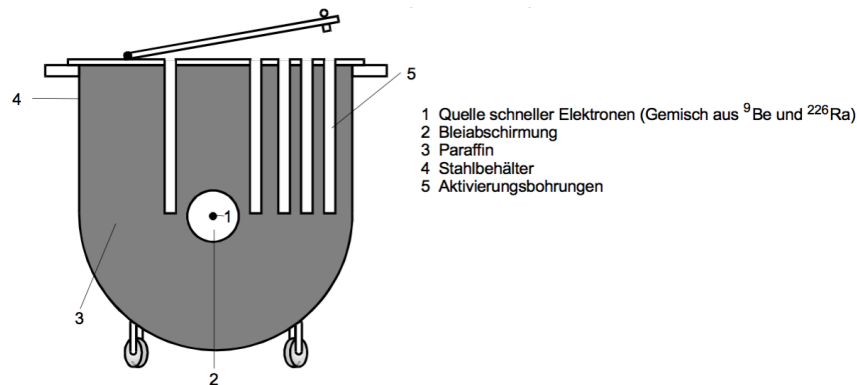
Dies lässt sich anschaulich darüber erklären, dass sich langsame Neutronen länger in der Nähe eines Kerns aufhalten und somit die Wahrscheinlichkeit eines Einfangs steigt. Es kann zudem zu Resonanzeffekten kommen, falls die Energie des Neutrons genau die Energiedifferenz zweier Anregungszustände des Zwischenkerns trifft.

Da freie Neutronen allerdings nur eine Halbwertszeit von etwa 15 Minuten besitzen und somit recht schnell zerfallen, müssen auch die zur Aktivierung benötigten Neutronen zunächst vor dem Experiment erzeugt werden. Dies erfolgt über die Bestrahlung von Beryllium mit  $\alpha$ -Teilchen aus dem Zerfall von  $^{226}_{88}\text{Ra}$ , wobei die Reaktion



abläuft.

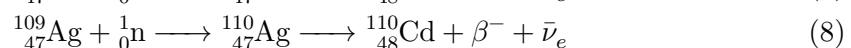
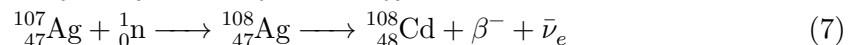
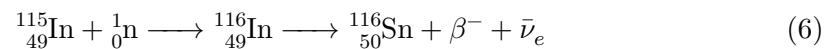
Da die Neutronen aufgrund des kontinuierlichen Energiespektrums teilweise sehr hohe Energien von bis zu 13,7 MeV besitzen, müssen sie zunächst noch abgebremst werden um die bereits erwähnte, möglichst geringe Geschwindigkeit zu erreichen. Dazu werden die Neutronen in eine dicke Schicht aus Atomen mit möglichst leichten Kernen geleitet, da dabei durch elastische Stöße eine hohe Energieübertragung stattfindet. In diesem Aufbau wird dazu Paraffin verwendet, wie in Abbildung 1 zu sehen ist, da es einen hohen Anteil an Wasserstoff-Atomen besitzt.



**Abbildung 1:** Skizzierter Querschnitt der Neutronenquelle [1].

Anschließend haben die Neutronen eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 2,2 km/s und werden als thermische Neutronen bezeichnet.

Bei diesem Versuch wird die Aktivierung der stabilen Isotope  $^{115}_{49}\text{In}$ ,  $^{107}_{47}\text{Ag}$  und  $^{109}_{47}\text{Ag}$  und der anschließende Zerfalls der somit neu entstandenen Isotope untersucht. Die Reaktionsgleichungen lauten hierbei:



Der  $\beta^-$ -Zerfall der instabilen Isotope verläuft dabei gemäß der Gesetzmäßigkeit des radioaktiven Zerfalls, bei welchen die Anzahl N der zum Zeitpunkt t noch nicht zerfallenen

Kerne durch

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (9)$$

gegeben ist, wobei  $N_0$  die Anfangszahl der radioaktiven Kerne bezeichnet und  $\lambda$  die Zerfallskonstante, welche durch die Gleichung

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (10)$$

mit der Halbwertszeit  $T$  verknüpft ist.

Da die direkte Messung von  $N(t)$  jedoch sehr schwierig ist, werden bei diesem Versuch die Anzahl der in einem bestimmten Zeitintervall  $\Delta t$  zerfallenden Kerne  $N_{\Delta t}$  verwendet, welche sich leicht durch beispielsweise ein Geiger-Müller-Zählrohr messen lassen. Diese Anzahl ist gegeben durch

$$N_{\Delta t} = N(t) - N(t + \Delta t), \quad (11)$$

woraus sich durch die Formel 9 die Gleichung

$$N_{\Delta t} = N_0 e^{-\lambda t} - N_0 e^{-\lambda(t+\Delta t)} = N_0 (1 - e^{-\lambda \Delta t}) e^{-\lambda t} \quad (12)$$

ergibt, und somit also auch

$$\ln N_{\Delta t} = \ln N_0 (1 - e^{-\lambda \Delta t}) - \lambda t. \quad (13)$$

Wichtig ist es dabei ein geeignetes Zeitintervall  $\Delta t$  zu wählen, um sowohl den statistischen Fehler von  $N_{\Delta t}$  aufgrund von zu kleinen  $\Delta t$  als auch den systematischen Fehler von  $\lambda$  durch zu groß gewählte  $\Delta t$  gering zu halten.

Zudem ist bei der Messung von Silber zu beachten, dass das natürliche Silber stets aus einem Gemisch aus etwa 51,8% des Isotops  $^{107}_{47}\text{Ag}$  und etwa 48,2%  $^{109}_{47}\text{Ag}$  besteht, sodass zunächst die Zerfallsreaktionen von  $^{108}_{47}\text{Ag}$  und  $^{110}_{47}\text{Ag}$  parallel zueinander ablaufen und sich bei der Messung nicht unterscheiden lassen. Da das Isotop  $^{110}_{47}\text{Ag}$  jedoch eine kürzere Halbwertszeit besitzt, ist dieser Anteil nach einer gewissen Zeit  $t^*$ , welche selbst aus dem Graphen festgelegt wird, praktisch fast vollständig zerfallen. Die gemessene Aktivität rührt ab da zu einem großen Teil nur noch vom langlebigeren Isotop  $^{108}_{47}\text{Ag}$  her. Für größere Zeiten als dieses  $t^*$  lässt sich im Zerfalls-Diagramm, welches in Abbildung 2 dargestellt ist, eine Gerade erkennen, sodass sich mit diesen Wertepaaren durch eine lineare Ausgleichsrechnung die Zerfallskonstante  $\lambda_l$  des langlebigeren  $^{108}_{47}\text{Ag}$  bestimmen lässt, wobei die Zerfallsgleichung damit

$$N_l(t) = N_{0l} e^{-\lambda_l t} \quad (14)$$

lautet.

Zur Bestimmung der kleineren Zerfallskonstante  $\lambda_k$  werden von den insgesamt gemessenen Werten  $N_{\Delta t}$  zunächst die Werte

$$N_{\Delta tl} = N_{0l} (1 - e^{-\lambda_l \Delta t}) e^{-\lambda_l t} \quad (15)$$

subtrahiert, und anschließend mit der Differenz eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, jedoch nur für Zeiten kleiner als ein Zeitpunkt  $t_i$  mit  $t_i < t^*$ , sodass die statistischen Schwankungen nicht zu groß werden.

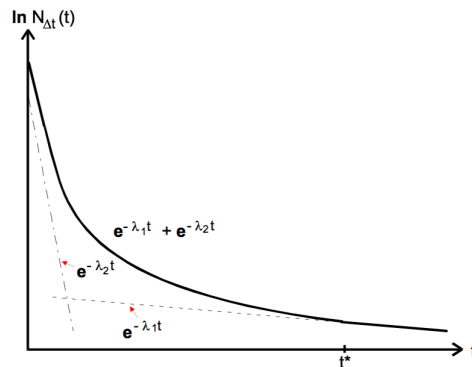


Abbildung 2: Skizzierter Querschnitt der Neutronenquelle [1].

### 3 Durchführung

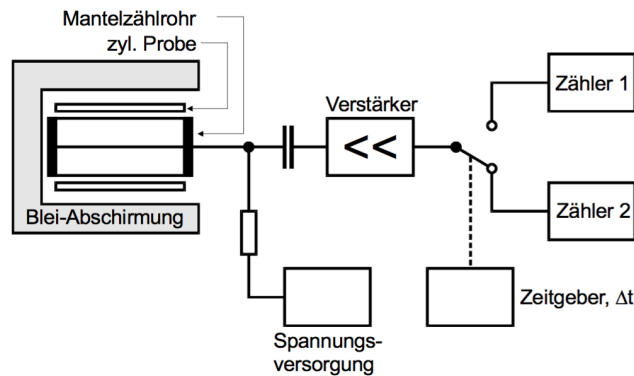


Abbildung 3: Versuchsaufbau [1].

Die Messapparatur ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Das Geiger-Müller-Zählrohr, welches sich in einer Bleiabschirmung befindet, misst hierbei einen konstanten Anteil der emittierten  $\beta^-$ -Strahlung. Damit durchgängig gemessen werden kann, besitzt das Messgerät zwei Anzeigen, zwischen welchen nach jeder Messung gewechselt wird.

Zunächst muss über einen Zeitraum von  $\Delta t = 900$  s der sogenannte Nulleffekt gemessen werden, also die natürliche radioaktive Strahlung und die Höhenstrahlung, was bei der Auswertung von jedem Messwert abgezogen werden muss.

Bei der Messung von Silber wird an der Messapparatur ein Zeitintervall von  $\Delta t = 8$  s eingestellt und insgesamt 44 Messwerte notiert. Die Messung von Indium erfolgt bei einem Zeitintervall von  $\Delta t = 240$  s mit 15 Messwertpaaren.

## 4 Auswertung

Allgemein lässt sich aus den Werten für die Anzahl  $N$  der Impulse der Fehler über

$$\Delta N = \sqrt{N} \quad (16)$$

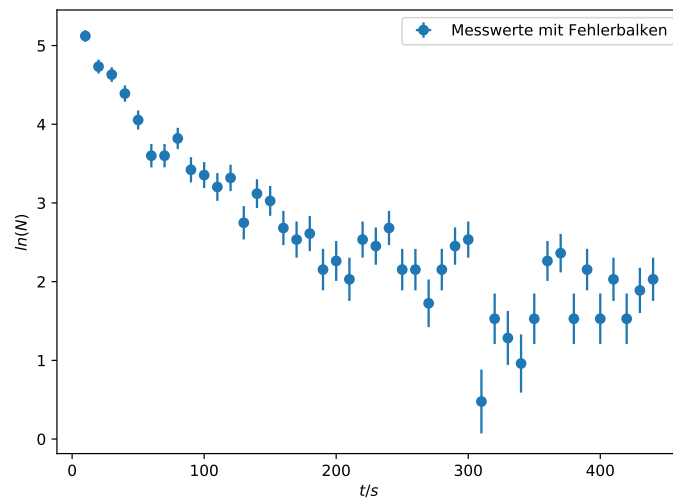
Bei der Nullmessung wird  $N_u=215$  gemessen. Unter Berücksichtigung der Zeitspanne von  $\Delta t = 900 \text{ s}$  und Gleichung 16 ergibt sich als normierte Nullmessung:

$$N_{un} = (0,24 \pm 0,02) \quad (17)$$

Die Ergebnisse der Messung Halbwertszeitmessung von Silber sind in Tabelle 1 zu sehen. Diese werden zunächst in Abbildung 4 halblogarithmisch gegen die Zeit  $t$  aufgetragen.

**Tabelle 1:** Messwerte für Silber mit  $\Delta t = 10 \text{ s}$ .

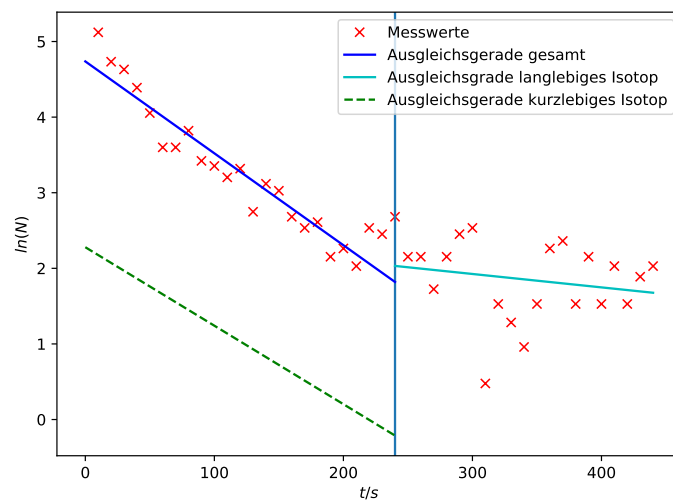
Messreihe	N pro $\Delta t$	Messreihe	N pro $\Delta t$	Messreihe	N pro $\Delta t$
1	170	16	17	31	4
2	116	17	15	32	7
3	105	18	16	33	6
4	83	19	11	34	5
5	60	20	12	35	7
6	39	21	10	36	12
7	39	22	15	37	13
8	48	23	14	38	7
9	33	24	17	39	11
10	31	25	11	40	7
11	27	26	11	41	10
12	30	27	8	42	7
13	18	28	11	43	9
14	25	29	14	44	10
15	23	30	15		



**Abbildung 4:** Halblogarithmisch aufgetragene Messwerte für Ag mit Fehlerbalken.

In einem zweiten Diagramm 5 werden folgende Ausgleichsgeraden eingezeichnet:

- 1) Von  $t = 0$  bis  $t^*$  eine Ausgleichsgerade für den gesamten Zerfall
- 2) Von  $t^*$  an für den langlebigen Zerfall von  $^{108}\text{Ag}$ .
- 3) Von  $t = 0$  bis  $t^*$  die Differenz aus dem Gesamten Zerfall und dem langlebigen Zerfall, somit bleibt der kurzlebige Zerfall von  $^{110}\text{Ag}$  übrig. Außerdem wird die Zeit  $t^* = 240\text{ s}$ , an der das kurzlebige Isotop zerfallen ist abgelesen.



**Abbildung 5:** Halblogarithmisch aufgetragene Messwerte für Ag mit Ausgleichsgeraden.

Aus Gleichung 13 kann entnommen werden, dass die Steigungen der Ausgleichsgeraden



gerade der Zerfallskonstante  $\lambda$  entsprechen, da  $\ln(N_0(1 - \exp(-\lambda\Delta t)))$  eine Konstante ist kann auch

$$\ln(N_{\Delta t}(t)) = -\lambda t + b \quad (18)$$

geschrieben werden. Es werden folgende Geradensteigungen ermittelt:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ges}} &= (11,22 \pm 0,82) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \\ \lambda_{\text{lang}} &= (1,50 \pm 1,37) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \\ \lambda_{\text{kurz}} &= (9,7 \pm 1,6) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \end{aligned}$$

Somit lauten die dazugehörigen Geradengleichungen:

$$\begin{aligned} \ln(N_{\Delta t \text{ ges}}(t)) &= (11,22 \pm 0,82) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \cdot t + (4,73 \pm 0,11) \\ \ln(N_{\Delta t \text{ lang}}(t)) &= (1,50 \pm 1,37) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \cdot t + (2,68 \pm 0,47) \\ \ln(N_{\Delta t \text{ kurz}}(t)) &= (9,7 \pm 1,6) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \cdot t + (2,0 \pm 0,5) \end{aligned}$$

Nach Formel 18 entspricht  $\ln(N_0(1 - \exp[-\lambda\Delta t]))$  gerade  $b$ , somit folgt:

$$\begin{aligned} N_{0,\text{kurz}}(1 - \exp[-\lambda\Delta t]) &= 10 \pm 7 \\ N_{0,\text{lang}}(1 - \exp[-\lambda\Delta t]) &= 12 \pm 8 \\ N_{0,\text{ges}}(1 - \exp[-\lambda\Delta t]) &= 114 \pm 13 \end{aligned}$$

Aus den Zerfallskonstanten lassen sich nach Gleichung 10 die Halbwertszeiten berechnen:

$$\begin{aligned} T_{\text{ges}} &= (62 \pm 5) \text{ s} \\ T_{\text{lang}} &= (500 \pm 400) \text{ s} \\ T_{\text{kurz}} &= (71 \pm 12) \text{ s} \end{aligned}$$

Um zu zeigen, dass die Relation

$$N_{\Delta t, \text{kurz}}(t_i) \ll N_{\Delta t, \text{lang}}(t_i) \quad (19)$$

gilt, werden die Werte an der Stelle  $t^*$  berechnet.

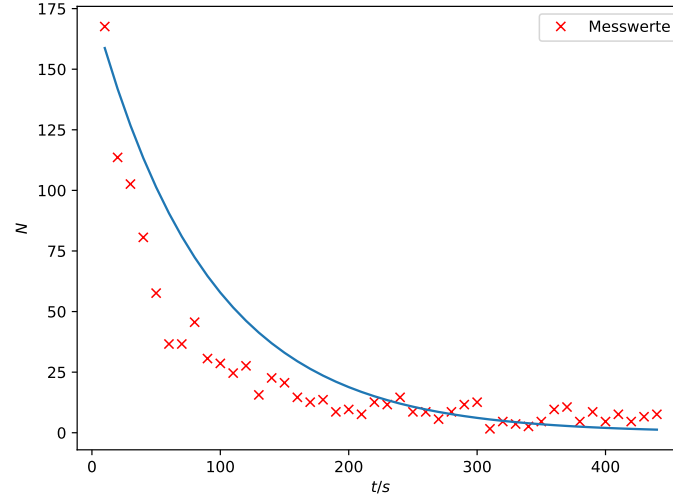
$$N_{\Delta t, \text{kurz}}(t^*) \ll N_{\Delta t, \text{lang}}(t^*) \quad (20)$$

$$0,1 \pm 0,6 \ll 2,4 \pm 0,5 \quad (21)$$

$$(22)$$

Da die Steigungen beide negativ sind, ist diese Ungleichung also immer erfüllt, wenn sie am Ort  $t^*$  erfüllt ist.

Zuletzt werden die Summenkurve aus den errechneten Werten zusammen mit den Messwerten in einem Diagramm dargestellt, dies ist in Abbildung 6 zu sehen.

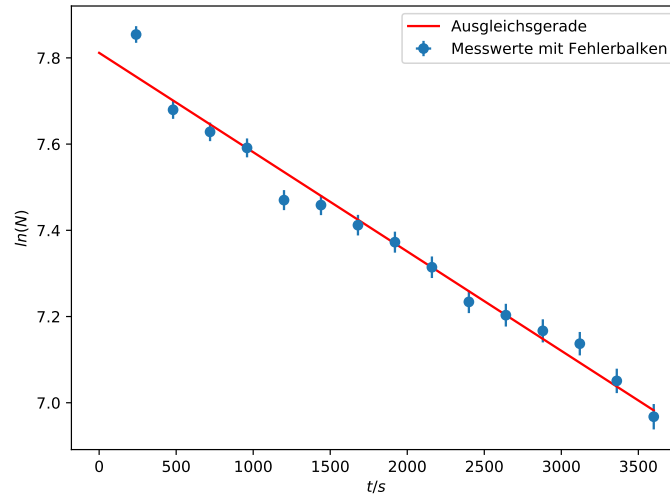


**Abbildung 6:** Summenkurve zusammen mit den Messwerten.

Für Indium, dessen Messwerte in Tabelle 2 zu sehen sind, wird ähnlich vorgegangen. Die Messwerte werden mit Fehlerbalken und Ausgleichsgerade halblogarithmisch aufgetragen, dies ist in Abbildung 7 dargestellt ist.

**Tabelle 2:** Messwerte für Indium mit  $\Delta t = 240$  s.

Messreihe	N pro $\Delta t$	Messreihe	N pro $\Delta t$
1	2634	9	1559
2	2221	10	1443
3	2113	11	1401
4	2038	12	1353
5	1812	13	1315
6	1792	14	1211
7	1713	15	1119
8	1649		



**Abbildung 7:** Messwerte für Indium mit Fehlerbalken und Ausgleichsgerade.

Die so ermittelte Geradengleichung lautet:

$$N_{\Delta t}(t) = (23,1 \pm 9,4) \cdot 10^{-5} \frac{1}{s} \cdot t + (7,81 \pm 0,02)$$

Der Vergleich mit Gleichung 18 zeigt, dass die Größe  $\ln(N_0(1 - \exp[-\lambda\Delta t]))$  gerade dem y-Achsenabschnitt entspricht. Daraus folgt, dass

$$N_0(1 - \exp[-\lambda\Delta t]) = (2,47 \pm 0,05) \cdot 10^3$$

Äquivalent zur vorherigen Rechnung ergibt sich aus der Zerfallskonstante  $\lambda$ , bzw. der Steigung der Geraden nach Formel 10 die Halbwertszeit

$$T = (3,01 \pm 0,12) \cdot 10^3 \text{ s.}$$

## 5 Diskussion

Die Zerfallskurve von Ag setzt sich aus einem langlebigen und einem kurzlebigen Isotop zusammen. Die Daten für das langlebige Isotop werden durch eine Ausgleichsgerade ab dem Zeitpunkt  $t^*$  bestimmt, ab dem das kurzlebige Isotop zerfallen ist. Aus der Differenz der Gesamtkurve und der des langlebigen Isotops lassen sich die Daten des kurzlebigen Isotops ermitteln. Aus der über die Ausgleichsgeraden ermittelten Zerfallskonstanten  $\lambda$ :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ges}} &= (11,22 \pm 0,82) \cdot 10^{-3} \frac{1}{s} \\ \lambda_{\text{lang}} &= (1,50 \pm 1,37) \cdot 10^{-3} \frac{1}{s} \\ \lambda_{\text{kurz}} &= (9,7 \pm 1,6) \cdot 10^{-3} \frac{1}{s} \end{aligned}$$

lassen sich die entsprechenden Halbwertszeiten  $T$  bestimmen, diese werden mit den Theoriewerten verglichen:

$$\begin{aligned}
 T_{ges} &= (62 \pm 5) \text{ s} \\
 T_{lang} &= (500 \pm 400) \text{ s} & T_{\text{Theorie, lang}} &= (142,92 \pm 0,66) \text{ s} \\
 \Rightarrow \text{ Abweichung: } &= 250\% \\
 T_{kurz} &= (71 \pm 12) \text{ s} & T_{\text{Theorie, kurz}} &= (24,56 \pm 0,11) \text{ s} \\
 \Rightarrow \text{ Abweichung: } &= 190\%
 \end{aligned}$$

[3] Die Abweichung des langlebigen Isotops vom Theoriewert ist sehr hoch, doch das Fehlerintervall ist ebenfalls sehr groß. Somit liegt der Fehler noch innerhalb eines Fehlerintervalls. Auch das kurzlebige Isotop weist einen großen Fehler auf, dieser liegt innerhalb vier Fehlerintervalle.

Für Indium wird genauso vorgegangen, aus der Zerfallskonstante  $\lambda = (23,1 \pm 9,4) \cdot 10^{-5}/\text{s}$  wird die Halbwertszeit bestimmt:

$$\begin{aligned}
 T &= (3,01 \pm 0,12) \cdot 10^3 \text{ s} & T_{\text{Theorie}} &= 3252 \text{ s} \\
 \Rightarrow \text{ Abweichung: } &= 7,44\%
 \end{aligned}$$

[2]

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 702: Aktivierung mit Neutronen.*
- [2] *Theoriewerte der Halbwertszeit für In.* URL: [https://chemglobe.org/ptoe/\\_/49\\_de.php](https://chemglobe.org/ptoe/_/49_de.php).
- [3] *Theoriewerte der Halbwertszeiten für Ag.* URL: <https://www.internetchemie.info/chemische-elemente/silber-isotope.php>.