

V702

# **Aktivierung mit Neutronen**

Jonas Osterholz

Moritz Rempe

Durchführung: 25.06.2019

Abgabe: 02.07.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Kernreaktion mit Neutronen . . . . .	3
2.2	Schnelle und langsame Neutronen . . . . .	3
2.3	Erzeugung langsamer Neutronen . . . . .	4
2.4	Der Zerfall instabiler Isotope . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Aufbau &amp; Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>6</b>
4.1	Indium . . . . .	6
4.2	Silber . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>
	<b>Literatur</b>	<b>15</b>

# 1 Zielsetzung

Im folgenden Versuch wird anhand der Methode der Aktivierung mit Neutronen die Halbwertszeit von zwei verschiedenen Nukliden bestimmt.

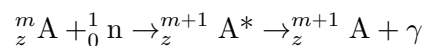
## 2 Theorie

Bei der Aktivierung mit Neutronen handelt es sich um einen Versuch mit radioaktiven Zerfällen. Dabei zerfallen instabile Atomkerne in stabile Atomkerne. Stabile Nuklide zeichnen sich durch ein festes Verhältnis von Neutronen und Protonen aus. Des Weiteren kann die Zerfallswahrscheinlichkeit der instabilen Nuklide durch die Halbwertszeit ausgedrückt werden, die angibt in welcher Zeitspanne von einer bestimmten Menge instabiler Nuklide noch die Hälfte vorhanden ist.

### 2.1 Kernreaktion mit Neutronen

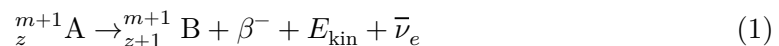
Zur Erzeugung von instabilen Nukliden werden stabile Nuklide mit Neutronen beschossen. Dabei müssen die Neutronen das Coulomb-Potential des Kerns nicht überwinden und brauchen somit weniger Energie.

Grundlegend wird also ein Kern A durch Beschuss eines Neutrons zum Zerfall angeregt. Zunächst fusionieren dabei der Ausgangskern A mit einem Neutron, wodurch der Kern in einen höheren Energiezustand A\*, der auch als Zwischenkern bezeichnet wird, wechselt. Um in den Grundzustand zu wechseln wird Energie in Form eines  $\gamma$ -Quants frei. Die Reaktion



bringt aber einen meist instabilen Kern hervor, da das Verhältnis zwischen der Kernladungszahl und der Ordnungszahl verändert wurde.

Dabei ist der entstandene Kern langlebiger als der Zwischenkern, wandelt sich aber aufgrund seiner Instabilität durch Emission eines Elektrons in einen stabilen Kern nach



um. Dabei ist  $\bar{\nu}_e$  ein Antineutrino und die kinetische Energien des Elektrons und des Antineutrinos  $E_{\text{kin}}$  der Massendefekt

$$\Delta E = \Delta mc^2,$$

der sich aus der Massendifferenz  $\Delta m$  der beiden Kerne A und B ergibt.

### 2.2 Schnelle und langsame Neutronen

Zusätzlich muss die Wahrscheinlichkeit für den Einfang eines Neutrons durch einen stabilen Kern berücksichtigt werden. Dabei wird der sogenannte Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  definiert, der die Fläche beschreibt, die der Kern haben müsste um jedes auftreffende

Neutron eingefangen werden würde. Es gilt bei einem Beschuss von  $n$  Neutronen pro Sekunde und  $u$  Einfängen auf eine  $1\text{ cm}^2$  Fläche einer dünnen Folie

$$\sigma = \frac{u}{nKd},$$

wobei  $d$  die Dicke der Folie und  $K$  die Anzahl der Atome pro Volumen angibt. Der Wirkungsquerschnitt wird in barn angegeben wobei  $1\text{ barn} = 10^{-24}\text{ cm}^2$  ist. Dabei ist  $\sigma$  stark geschwindigkeitsabhängig. Dazu wird mittels der De-Broglie-Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{m_n v}$$

zwischen langsamen und schnellen Neutronen differenziert. Dabei gilt bei hohen Geschwindigkeiten, also bei kleinen Wellenlängen gegen den Kernradius, dass es über geometrische Überlegungen zur Streuung kommt. Bei niedrigen Geschwindigkeiten hingegen ist aufgrund des Verhältnisses von Wellenlänge zum Kernradius der Vergleich zur geometrischen Optik nicht anwendbar. Es treten bei bestimmten Neutronengeschwindigkeiten Maxima des Wirkungsquerschnitts auf, weil es zur Resonanzabsorption kommt. Die Energie der Neutronen entspricht dann der Differenz zweier Energieniveaus des Zwischenkerns. Der Wirkungsquerschnitt wird nach Breit und Wigner dann nach

$$\sigma(E) = \sigma_0 \sqrt{\frac{E_r}{E}} \frac{\tilde{c}}{(E - E_r)^2 + \tilde{c}}$$

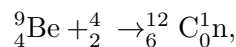
bestimmt, wobei  $\tilde{c}$  und  $\sigma_0$  charakteristische Größen für die ablaufende Kernreaktion sind. Falls die Energie des Neutrons gleich der Energie des Niveaus ist, wird der Term maximal. Mit der weiteren Annahme  $E \ll E_r$  ergeben sich die reziproken Proportionalitäten

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{1}{v}. \quad (2)$$

Somit werden die langsamen Neutronen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit absorbiert als schnelle Neutronen.

## 2.3 Erzeugung langsamer Neutronen

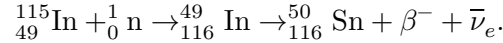
Da Neutronen aufgrund ihrer Instabilität nicht in der Natur vorkommen, werden sie durch den Beschuss von  $\alpha$ -Strahlung auf  ${}^9\text{Be}$  erzeugt. Dabei stammt die  $\alpha$ -Strahlung aus dem Zerfall von  ${}^{226}\text{Ra}$ . Somit folgt die Reaktionsgleichung



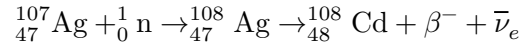
wobei die hier entstehenden Neutronen ein breites kontinuierliches Energiespektrum bis zu 13,7 MeV aufweisen. Die Neutronen werden durch dicke Materieschichten geleitet, wodurch elastische Stöße dann zur Abbremsung führen. Dabei ist die Wirkung der Verlangsamung maximal, wenn sich die Massen der beiden Stoßpartner, also die der Neutronen und der Atome der Materieschicht, nicht unterscheiden. Am besten geeignet dafür ist Wasserstoff. Somit ergibt sich durch mehrfache Stöße eine mittlere kinetische Energie von 0,025 eV bei einer Temperatur von 290 K. Das ergibt eine mittlere Geschwindigkeit für die sogenannten thermischen Neutronen von  $2,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ .

## 2.4 Der Zerfall instabiler Isotope

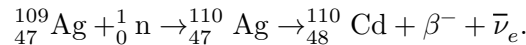
Die Proben werden nach Gleichung 1 zunächst durch den Beschuss mit Neutronen zu einem instabilen Atom angeregt. Dann zerfällt der instabile Kern nach Gleichung 1 durch die  $\beta^-$ -Strahlung in einen stabilen Zustand. Für Indium ergibt sich



Für Silber ergeben sich aufgrund der Tatsache, dass natürliches Silber aus zwei Isotopen besteht die Reaktionsgleichungen



und



Nach dem allgemeinen Zerfallsgesetz

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

wobei  $\lambda$  die Zerfallskonstante und  $N_0$  die Anzahl der instabilen Kerne ist. Die Halbwertszeit  $T$  beschreibt die Zeit, nach der die Hälfte der instabilen Kerne zerfallen ist. Nach

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T} \leftrightarrow T = \ln\left(\frac{2}{\lambda}\right) \quad (3)$$

lässt sich die Halbwertszeit bestimmen. Praktisch lässt sich die Halbwertszeit aber besser durch die Betrachtung von  $N(t)$  in einem Zeitintervall  $\Delta t$  bestimmen. Dann ergibt sich zunächst

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

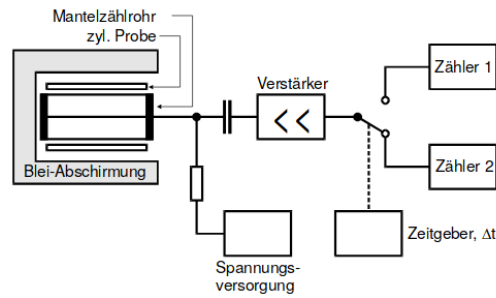
woraus sich durch Umformungen die Zerfallskonstante  $\lambda$  mittels lineare Regression nach

$$\ln(N_{\Delta t}) = \ln(N_0(1 - e^{-\lambda \Delta t})) - \lambda t. \quad (4)$$

Dabei ist  $\ln(N_0(1 - e^{-\lambda \Delta t}))$  konstant und  $\lambda$  gibt die Steigung der Geraden an. Es sollte darauf geachtet werden, dass  $\Delta t$  in einem gewissen Rahmen liegt, da es bei zu kleinen Zeitintervallen zu statistischen und bei zu großen Zeitintervallen zu systematischen Fehlern kommt.

## 3 Aufbau & Durchführung

Der prinzipielle Aufbau der Messvorrichtung ist in Abbildung 1 dargestellt. Über ein Geiger-Müller-Zählrohr werden die  $\beta$ - und  $\gamma$ -Teilchen als elektrische Impulse aufgezeichnet. Dabei wird es zur Verminderung der äußeren Strahlungseinflüsse von Blei umgeben. Über den Verstärker lassen sich die Zählraten auf einem bestimmten Zeitintervall  $\Delta t$  messen. Es werden zwei Zähler verwendet, da somit kein Zeitverlust durch das Zurücksetzen der Zählrate und durch das Neustarten des Zählrohrs entsteht.



**Abbildung 1:** Prinzipieller Aufbau der Messapparatur [1].

Des Weiteren sollte der Nulleffekt in der Auswertung berücksichtigt werden. Dabei wird eine Messung über 900s ohne Probe durchgeführt und von allen Messungen im Folgenden abgezogen.

Dann werden für die beiden Proben geeignete Zeitintervalle aus den vorgegebenen Bereichen gewählt, die Proben in die Vorrichtung eingesetzt und eine vorgegebene Anzahl von Messwerten aufgenommen. Für Indium werden 20 Werte jeweils mit einem Zeitintervall von 225s aufgenommen. Bei Silber werden 50 Werte mit einem deutlich kleineren Zeitintervall von 9s aufgenommen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte schnell notiert werden.

## 4 Auswertung

Zu Beginn wird der Nulleffekt bestimmt. Es wird folgender Wert in einem Messzeitraum von 900s gemessen:

$$N_0 = 244 \pm 15.62$$

Der statistische Fehler beträgt auch bei allen folgenden Messwerten

$$\Delta N = \sqrt{N} \quad (5)$$

### 4.1 Indium

Nun wird das Isotop  $In_{49}^{127}$  untersucht. Beim Zerfall werden folgende Werte gemessen (Tab 1):

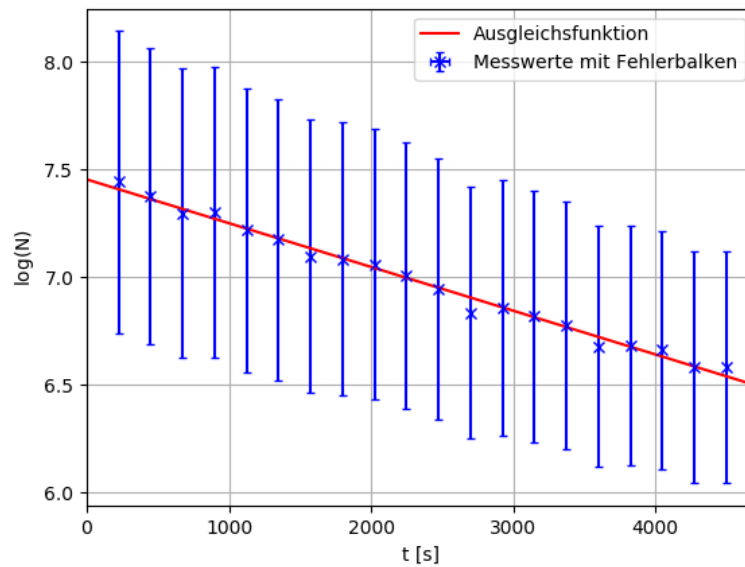
**Tabelle 1:** Messung des Zerfalls von  $In_{49}^{127}$ .

$t/s$	$N$	$\sqrt{N}$
225	1705	41.29
450	1596	39.95
675	1476	38.42
900	1485	38.54
1125	1364	36.93
1350	1303	36.10
1575	1208	34.76
1800	1193	34.54
2025	1162	34.09
2250	1103	33.21
2475	1036	32.19
2700	929	30.48
2925	950	30.82
3150	913	30.21
3375	875	29.58
3600	795	28.20
3825	799	28.27
4050	781	27.95
4275	720	26.83
4500	723	26.89

Die Fehler ergeben sich nach Gleichung 5. Werden diese Daten halblogarithmisch nach Gleichung 4 aufgetragen und mithilfe von linearer Regression nach

$$y = m \cdot x + b$$

eine Ausgleichsgerade eingetragen, so ergibt sich folgender Graph.



**Abbildung 2:** Zerfall von Indium.

Für die Regression ergeben sich folgende Parameter:

$$m = -0.0002 \pm 2.4 \cdot 10^{-11} \frac{1}{s}$$

$$b = 7.45 \pm 0.00017$$

Nach Gleichung 3 ergibt sich nun für die Halbwertszeit

$$T = \ln \frac{2}{m} = (3412.01 \pm 0.0004)s \quad (6)$$

Nach Gleichung 3 kann zudem die Größe

$$N(0)(1 - e^{-\Delta t \lambda}) = 1725.07 \pm 0.30$$

$$\Rightarrow N(0) = \frac{1725.07 \pm 0.30}{(1 - e^{-\Delta t \lambda})} = 2906.95 \pm 0.51$$

bestimmt werden. Hierbei handelt es sich um die Isotopanzahl zu Beginn des Zerfalls.

## 4.2 Silber

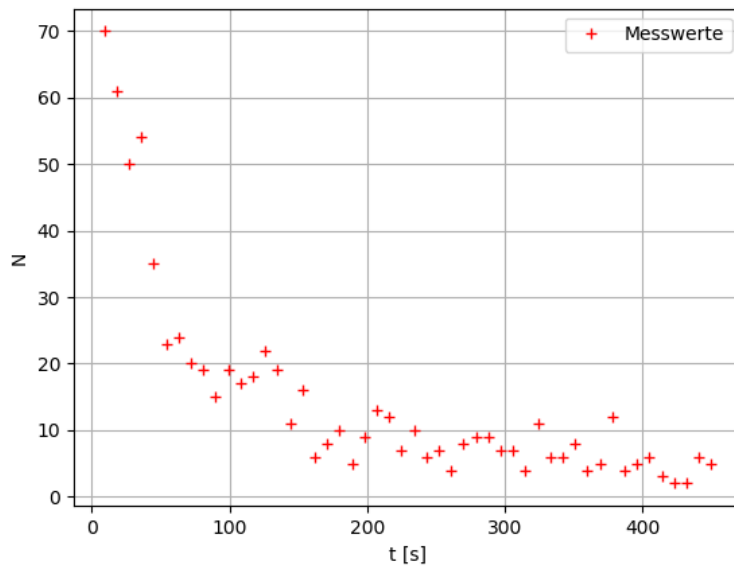
Das Isotop  $Ag^{108}$  und  $Ag^{107}$  wird nun untersucht. Bei dem Zerfall werden folgende Werte gemessen (Tab. 2). Die Fehler ergeben sich nach Gleichung 5.

Die Werte aus Tabelle 2 sind in Abbildung 3 abgebildet.



**Tabelle 2:** Messwerte von Ag.

$t/s$	$N$	$\sqrt{N}$	$t/s$	$N$	$\sqrt{N}$
9	70	8.37	234	10	3.16
18	61	7.81	243	6	2.45
27	50	7.07	252	7	2.65
36	54	7.35	261	4	2.00
45	35	5.92	270	8	2.83
54	23	4.80	279	9	3.00
63	24	4.90	288	9	3.00
72	20	4.47	297	7	2.65
81	19	4.36	306	7	2.65
90	15	3.87	315	4	2.00
99	19	4.36	324	11	3.32
108	17	4.12	333	6	2.45
117	18	4.24	342	6	2.45
126	22	4.69	351	8	2.83
135	19	4.36	360	4	2.00
144	11	3.32	369	5	2.24
153	16	4.00	378	12	3.46
162	6	2.45	387	4	2.00
171	8	2.83	396	5	2.24
180	10	3.16	405	6	2.45
189	5	2.24	414	3	1.73
198	9	3.00	423	2	1.41
207	13	3.61	432	2	1.41
216	12	3.46	441	6	2.45
225	7	2.65	450	5	2.23

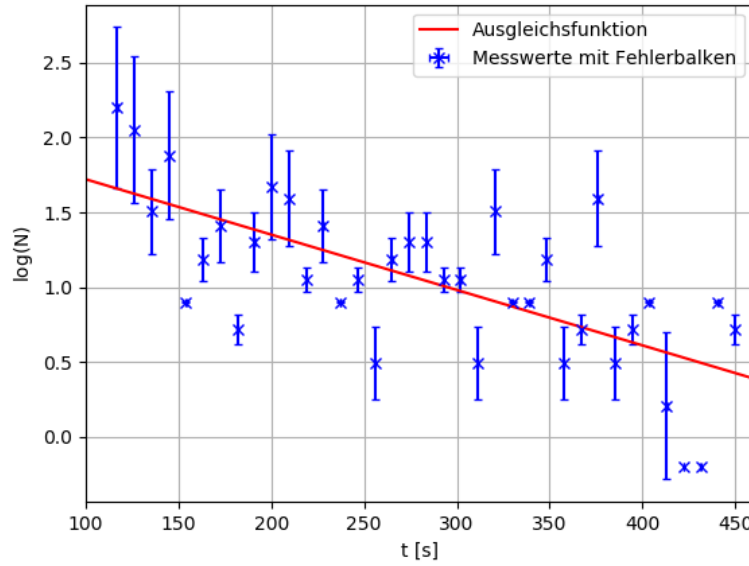


**Abbildung 3:** Zerfall von Silber.

Aus diesem Zerfall wird nun zunächst der langlebige Zerfall von  $Ag^{108}$  untersucht. Sobald der Zerfall aus Abbildung 3 linear verläuft, wird angenommen, dass nur noch der langlebige Zerfall stattfindet. Für diesen Zeitpunkt wird  $t^* = 117s$  gewählt. Werden diese Daten halblogarithmisch nach Gleichung 4 aufgetragen und mithilfe von linearer Regression nach

$$y = m \cdot x + b$$

eine Ausgleichsgerade eingetragen, so ergibt sich folgender Graph (Abb. 4).



**Abbildung 4:** Zerfall des langlebigen Silber-Isotops  $Ag^{108}$ .

Für die Regression ergeben sich folgende Parameter:

$$m = -0.0053 \pm 2.4 \cdot 10^{-7} \frac{1}{s}$$

$$b = 2.605 \pm 0.014$$

Nach Gleichung 3 ergibt sich nun erneut für die Halbwertszeit

$$T_1 = \ln \frac{2}{m} = (130.886 \pm 0.005)s \quad (7)$$

Nach Gleichung 3 kann zudem die Größe

$$N(0)(1 - e^{-\Delta t \lambda}) = 13.46 \pm 0.19$$

$$\Rightarrow N(0) = \frac{13.46 \pm 0.19}{(1 - e^{-\Delta t \lambda})} = 29.13 \pm 0.21$$

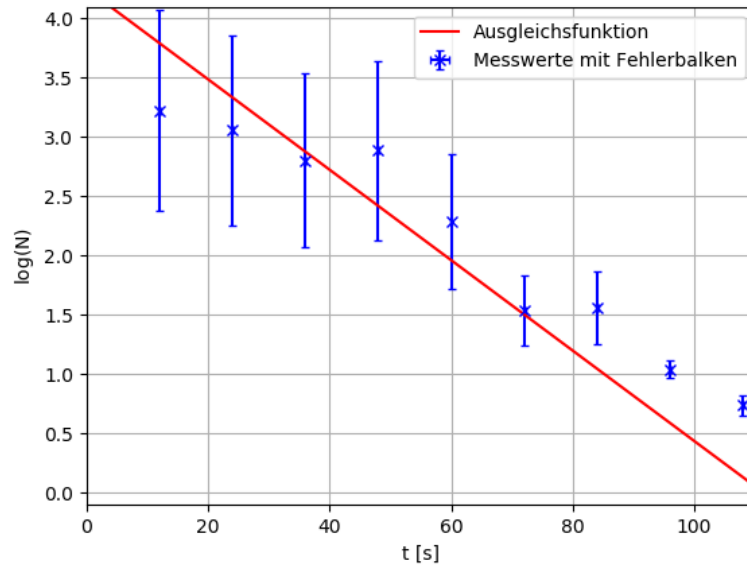
bestimmt werden.

Um nun den Zerfall des kurzlebigen Silber-Isotops  $Ag^{110}$  zu bestimmen wird vom gesamten Zerfall der des langlebigen abgezogen:

$$N_{\Delta t_s}(t) := N_{\Delta t_{\text{gesamt}}} - N_{0,l}e^{-\lambda_l t} = N_{0,s}e^{-\lambda_s t}$$

$N_{\Delta t_s}(t)$  ist die Isotopanzahl des kurzlebigen Isotops nach einer Zeit  $\Delta t$ ,  $N_{0,l}$  ist die Isotopanzahl des langlebigen Isotops zu Beginn und  $\lambda_l$  ist die Zerfallskonstante des langlebigen Isotops und  $N_{0,s}$  die Isotopanzahl des kurzlebigen Isotops zu Beginn. Wird

nun nur der Zeitraum bis 117 Sekunden betrachtet (Messwerte siehe 3) und der Zerfall des langlebigen Isotops abgezogen, so ergibt sich folgender halblogarithmischer Graph mit Ausgleichsgrade anhand linearer Regression:



**Abbildung 5:** Zerfall des kurzlebigen Silber-Isotops  $Ag^{110}$ .

**Tabelle 3:** Messwerte des kurzlebigen Isotops.

$t/s$	$N$	$\sqrt{N}$
9	61.53	7.84
18	52.14	7.22
27	40.74	6.38
36	44.31	6.66
45	24.86	4.99
54	12.40	3.52
63	12.91	3.59
72	8.40	2.90
81	6.87	2.62
90	2.31	1.12
99	5.72	2.39
108	3.11	1.76
117	3.47	1.86

Die Fehler ergeben sich nach Gleichung 5. Für die Regression ergeben sich folgende

Parameter:

$$m = -0.047 \pm 7.0 \cdot 10^{-5} \frac{1}{s}$$

$$b = 3.85 \pm 0.11$$

Nach Gleichung 3 ergibt sich nun erneut für die Halbwertszeit

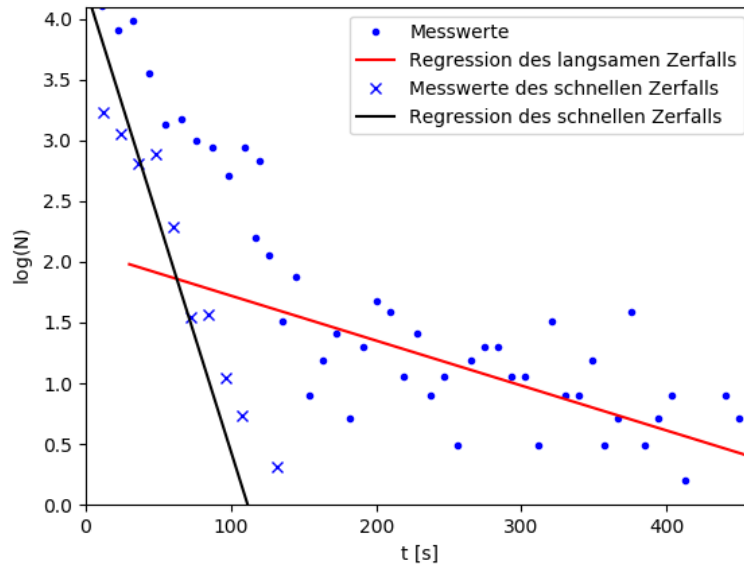
$$T_2 = \ln \frac{2}{m} = (14.697 \pm 0.022)s \quad (8)$$

Nach Gleichung 3 kann zudem die Größe

$$N(0)(1 - e^{-\Delta t \lambda}) = 47 \pm 5$$

$$\Rightarrow N(0) = \frac{47 \pm 5}{(1 - e^{-\Delta t \lambda})} = 51.77 \pm 5.51$$

bestimmt werden.



**Abbildung 6:** Summenkurve von Silber.

Um zum Schluss die Ungleichung

$$N_{\Delta, kurz}(t_i) \ll N_{\Delta, lang}(t_i)$$

zu beweisen, werden die beiden Werte zum Zeitpunkt  $t_i = 117s$  bestimmt (siehe oben). Daraus folgt:

$$7.5 \pm 0.6 \ll 14.5 \pm 0.6.$$

Somit ist die Ungleichung bestätigt.

## 5 Diskussion

Werden die im Versuch ermittelten Halbwertszeiten mit den theoretischen Werten verglichen, ergeben sich folgende Abweichungen:

Indium [2]:

$$T_{\text{gemessen}} = (3412.01 \pm 0.0004)\text{s} = 56.87 \pm 6.7 \cdot 10^{-7}\text{min}$$

$$T_{\text{theoretisch}} = 54.3\text{min}$$

Für Indium ergibt sich somit nach

$$\text{Abweichung} = \frac{T_{\text{gemessen}} - T_{\text{theoretisch}}}{T_{\text{gemessen}}} \cdot 100\% \quad (9)$$

eine Abweichung von ca. 4.5%.

Silber,  $Ag^{108}$ [3]:

$$T_{\text{gemessen}} = 130.886 \pm 0.005\text{s} = 2.18\text{min}$$

$$T_{\text{theoretisch}} = 2.38\text{min}$$

Für  $Ag^{108}$  ergibt sich somit nach 5 eine Abweichung von ca. 9.2%.

Silber,  $Ag^{110}$ [3]:

$$T_{\text{gemessen}} = 14.697 \pm 0.022\text{s}$$

$$T_{\text{theoretisch}} = 24.56\text{s}$$

Für  $Ag^{110}$  ergibt sich somit nach 5 eine Abweichung von ca. 67.1%.

Auffällig ist die hohe Abweichung bei dem kurzlebigen Silber-Isotop. Es ist möglich, dass bereits in dem Zeitraum des Herausnehmens der Probe bis zum Startpunkt der Messung ein erheblicher Anteil des Isotops zerfallen ist und somit die Halbwertszeit scheinbar früher erreicht wird. Die Summenkurve 6 zeigt sehr gut den Verlauf der beiden Zerfälle und ihre unterschiedlichen Halbwertszeiten. Die Ungleichung wurde bestätigt. Jedoch entspricht sie nicht der Bedingung, dass  $N_{\Delta, \text{kurz}}(t_i)$  viel kleiner  $N_{\Delta, \text{lang}}(t_i)$  ist, weshalb die Rechnungen teils ungenau sind. Jedoch handelt es sich, nach mehrfacher Variation, bei dem gewählten  $t$  um den best-möglichen Wert. Der Zeitpunkt  $t^*$  ist somit richtig gewählt.

Die Messung des Indiums hingegen ist sehr genau. Hierbei handelt es sich auch um eine höhere Halbwertszeit, weshalb die Überführung der Probe keinen großen Einfluss auf die Messgenauigkeit hat.

Die Größe  $N(0)$  bei den beiden Silber-Isotopen liegen ungewöhnlich weit auseinander. Während bei dem  $Ag^{108}$ -Isotop der Wert  $N(0) = 51.77 \pm 5.51$  beträgt, so liegt er bei dem  $Ag^{110}$ -Isotop lediglich bei  $N(0) = 29.13 \pm 0.21$ . Gewöhnlich sind die beiden Werte ungefähr identisch. Dies kann an dem zuvor genannten Problem der sehr kurzen Halbwertszeiten liegen. Durch die verfälschte Ausgleichsrechnung werden hier auch verfälschte Werte errechnet.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zum Experiment V702 - Aktivierung mit Neutronen*. 2019.
- [2] URL: <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=isotope&el=49&mz=116&nrg=0.1273&show=nuklid&sel=>
- [3] URL: <https://www.internetchemie.info/chemische-elemente/silber-isotope.php>.