

V702

## **Aktivierung mit Neutronen**

Jannis Speer

jannis.speer@tu-dortmund.de

Kevin Talits

kevin.talits@tu-dortmund.de

Durchführung: 22.05.18

Abgabe: 29.05.18

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Kernreaktionen mit Neutronen . . . . .	3
2.2	Wirkungsquerschnitt . . . . .	3
2.3	Erzeugung niederenergetischer Neutronen . . . . .	4
2.4	Zerfall instabiler Isotope . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>5</b>
4.1	Nullrate . . . . .	5
4.2	Indium . . . . .	5
4.2.1	Halbwertszeit . . . . .	7
4.3	Silber . . . . .	7
4.3.1	$^{107}\text{Ag}$ . . . . .	11
4.3.2	Halbwertszeit $^{107}\text{Ag}$ . . . . .	11
4.3.3	$^{109}\text{Ag}$ . . . . .	12
4.3.4	Halbwertszeit $^{109}\text{Ag}$ . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>15</b>
	<b>Literatur</b>	<b>15</b>

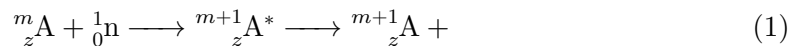
# 1 Einleitung

In diesem Versuch werden die Halbwertszeiten von Indium und Silber bestimmt, die zuvor mit Neutronen aktiviert werden.

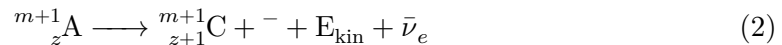
## 2 Theorie

### 2.1 Kernreaktionen mit Neutronen

Da Neutronen nicht die Coulomb-Barriere eines Kerns überwinden müssen, sind sie besonders gut dafür geeignet, instabile Nuklide zu erzeugen. Im folgenden Kapitel wird deshalb, die Wechselwirkung zwischen Neutronen und Kernen näher erläutert. Durch die Absorption eines Neutrons entsteht ein neuer Kern  $A^*$ , der Zwischenkern, dessen Energie um die kinetische Energie und die Bindungsenergie des Neutrons zunimmt. Aufgrund der starken Wechselwirkung verteilt sich die Energie auf alle Nukleonen und der Neutroneneinfang sorgt nicht für das Abstoßen eines Nukleons aus dem Kern. Stattdessen emittiert der angeregte Zwischenkern ein  $\gamma$ -Quant und geht in seinen Grundzustand über.



Der neue Kern  ${}_z^{m+1} A$  ist meistens instabil, da er im Vergleich zu einem stabilen Kern gleicher Ordnungszahl mehr Neutronen enthält. Durch einen  $\beta$ -Zerfall, bei dem infolge des Massendefekts Energie frei wird, wandelt er sich in einen stabilen Kern um. [1]



### 2.2 Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutron eingefangen wird. Er beschreibt die fiktive Fläche, die ein Kern besitzen müsste, um jedes eintreffende Neutron einzufangen. Folgende Gleichung lässt sich so aufstellen, wenn  $n$  Neutronen pro Sekunde  $1 \text{ m}^2$  einer dünnen Folie (Dicke  $d$ ,  $K$  Atome/ $\text{m}^3$ ) treffen und dabei  $u$  Einfänge auftreten.

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

Im Falle der Neutronenabsorption ist der Wirkungsquerschnitt stark von der Geschwindigkeit  $v$  bzw. der kinetischen Energie der Neutronen  $E$  abhängig. Für langsame Neutronen besteht folgender proportionaler Zusammenhang zwischen Neutronenenergie  $E$  und Wirkungsquerschnitt  $\sigma$ :

$$\sigma \propto 1/\sqrt{E} \propto 1/v \quad (4)$$

Anschaulich kann die größere Absorptionswahrscheinlichkeit der langsamen Neutronen mit ihrer längeren Aufenthaltszeit im Einwirkungsbereich des Kerns erklärt werden. [1]

## 2.3 Erzeugung niederenergetischer Neutronen

Aufgrund seiner Instabilität kommt das Neutron nicht natürlich vor, sondern muss künstlich freigesetzt werden. In diesem Versuch wird das zum Beispiel durch Beschuss von  ${}^9_4\text{Be}$ -Kernen mit  $\alpha$ -Strahlung realisiert, die aus dem Zerfall von  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  entsteht.



Zur Abbremsung werden die Neutronen, die ein kontinuierliches Energiespektrum besitzen, durch ein Material mit leichten Kernen geschickt (in diesem Experiment Paraffin). Zwischen den Neutronen und den Kernen finden elastische Stöße statt, bei denen die Neutronen durch Energieübertragung an die Kerne langsamer werden. Das funktioniert umso besser, je leichter die Kerne sind, weshalb Moleküle benutzt werden, die Wasserstoff enthalten, wie das Paraffin (gesättigte Kohlenwasserstoffe). Die Neutronen erreichen so annähernd die mittlere kinetische Energie der Moleküle von 0,025 eV, was einer Geschwindigkeit von 2,2 km/s entspricht. Diese Neutronen werden thermische Neutronen genannt. [1]

## 2.4 Zerfall instabiler Isotope

Indium und Silber können durch die in Kapitel 2.1 erwähnten Prozesse in instabile Isotope umgewandelt werden, die in einem  $\beta$ -Zerfall wieder in stabile Nuklide übergehen. Für einen radioaktiven Zerfall gilt allgemein für die Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne folgendes Gesetzmäßigkeit.

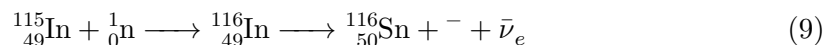
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

$N_0$  ist dabei die anfängliche Anzahl der Atome und  $\lambda$  die Zerfallskonstante. In der Praxis werden die Zerfälle  $N_{\Delta t}(t) = N(t) - N(t + \Delta t)$  in einem Zeitintervall  $\Delta t$  gemessen, um die Zerfallskonstante  $\lambda$  zu bestimmen. Gleichung (6) nimmt so dann folgende Form an.

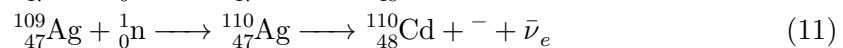
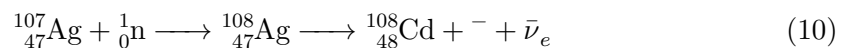
$$N_{\Delta t}(t) = N_0 e^{-\lambda t} - N_0 e^{-\lambda(t+\Delta t)} = N_0(1 - e^{-\lambda\Delta t})e^{-\lambda t} \quad (7)$$

$$\ln(N_{\Delta t}(t)) = \ln(N_0(1 - e^{-\lambda\Delta t})) - \lambda t \quad (8)$$

Dabei muss auf eine geeignete Wahl von  $\Delta t$  geachtet werden. Denn ist  $\Delta t$  zu klein wird der statistische Fehler zu groß und ist  $\Delta t$  zu groß ist das radioaktive Präparat größtenteils schon zerfallen. Für Indium sieht der Zerfall folgendermaßen aus.



Da natürliches Silber aus den Isotopen  ${}^{107}_{47}\text{Ag}$  und  ${}^{109}_{47}\text{Ag}$  besteht, laufen zwei Zerfälle gleichzeitig ab, wenn das Silber durch Neutronenbeschuss aktiviert wird.



Eine Bestimmung der einzelnen Halbwertszeiten ist trotzdem möglich, denn nach ausreichender Zeit ist das kurzlebige Isotop  ${}^{110}_{47}\text{Ag}$  praktisch komplett zerfallen. Die gemessenen Zerfälle stammen nur noch vom langlebigen Isotop  ${}^{108}_{47}\text{Ag}$ . [1]

### 3 Durchführung

Bevor Messungen für die Halbwertszeiten von In und Ag durchgeführt werden, wird eine Messung ohne Probe vorgenommen. Diese dient der Bestimmung des Nulleffekts, der durch die Höhenstrahlung und natürliche Zerfälle, wie zum Beispiel von  $^{40}_{19}\text{K}$  erzeugt wird. Um den statistischen Fehler so gering wie möglich zu halten, wird die Zählrate über 900 Sekunden gemessen. Für Indium wird die Zählrate alle 60 Sekunden gemessen und das über den Zeitraum 1 Stunde. Die Messung für Silber dauert 7 Minuten und die Zählrate alle 10 Sekunden gemessen.

### 4 Auswertung

#### 4.1 Nullrate

Vor den Messungen muss die Nullrate bestimmt werden. Es wird über einen relativ großen Zeitraum gemessen, um den statistische Fehler gering zu halten. Bei einer Messzeit von  $t = 900\text{s}$  wird eine Zählrate von  $N = 178$  gemessen. Dies macht eine Nullrate von  $N_u \approx 2$  pro 10 Sekunden. Diese wird vor jeder folgenden Rechnung von der Zählrate abgezogen.

#### 4.2 Indium

Durch die Messung über eine Zeit von 60 Minuten mit Zeitintervallen von  $\Delta t = 240\text{s}$ , bei konstanter Spannung, werden folgende Messwerte für die Zählrate von Indium abzüglich der Nullrate ermittelt:

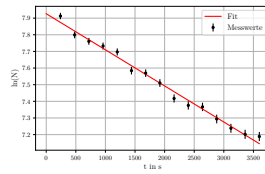
**Tabelle 1:** Messwerte Indium.

Messzeit $t$ in s	Zählrate $N$	$\Omega_N = \sqrt{N}$ -Fehler
240.0	2731.53	52.26
480.0	2439.53	49.39
720.0	2346.53	48.44
960.0	2281.53	47.76
1200.0	2201.53	46.92
1440.0	1967.53	44.35
1680.0	1938.53	44.02
1920.0	1826.53	42.73
2160.0	1664.53	40.79
2400.0	1596.53	39.95
2640.0	1582.53	39.78
2880.0	1471.53	38.36
3120.0	1391.53	37.30
3360.0	1342.53	36.64
3600.0	1324.53	36.39

Für die Abbildung 1 werden die logarithmischen Werte der Zählrate, sowie deren Fehler benötigt. In Tabelle 2 sind diese Werte zu sehen.

**Tabelle 2:** Logarithmische Messwerte Indium.

Messzeit $t$ in s	Zählrate $\ln(N)$	$\ln(N + \Omega_N) - \ln(N)$	$\ln(N) - \ln(N - \Omega_N)$
240.0	7.91	0.0189	0.0193
480.0	7.79	0.0200	0.0204
720.0	7.76	0.0204	0.0208
960.0	7.73	0.0207	0.0211
1200.0	7.60	0.0210	0.0215
1440.0	7.58	0.0222	0.0228
1680.0	7.56	0.0224	0.0229
1920.0	7.51	0.0231	0.0236
2160.0	7.41	0.0242	0.0248
2400.0	7.37	0.0247	0.0253
2640.0	7.36	0.0248	0.0254
2880.0	7.29	0.0257	0.0264
3120.0	7.23	0.0264	0.0271
3360.0	7.20	0.0269	0.0276
3600.0	7.18	0.0271	0.0278



**Abbildung 1:** Halblogarithmische Zerfallskurve für Indium.

Die Ausgleichsgerade wurde mit der Funktion

$$f(x) = ax + b \quad (12)$$

berechnet. Die Parameter  $a$  und  $b$  wurden berechnet zu

$$a = 0,000217 \pm (8,2 \cdot 10^{-8})$$

$$b = 7,926 \pm (2 \cdot 10^{-4})$$

Hier ist  $a$  die Zerfallskonstante  $\lambda$  und  $b$  ist  $\ln(N_0(1 - e^{-\lambda\Delta t}))$ .

#### 4.2.1 Halbwertszeit

Mit  $\lambda$  kann nun die Halbwertszeit berechnet werden. Durch einsetzen in die Formel

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (13)$$

ergibt sich für die Halbwertszeit von Indium

$$T = 3195,28 \pm 1,20 \text{ s}$$

Dies entspricht einer Zeit von  $t = 53$  Minuten und 15 Sekunden, mit gleicher Unsicherheit. In der Theorie wird ein Wert von  $T = 3257,4 \text{ s}$  [2] angegeben. Daraus ergibt sich eine prozentuale Abweichung von ca 1,9 % vom Theoriewert. Wobei der Fehler  $\Delta T = 1,20$  zu  $T$  mit folgender Formel berechnet wurde:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \sqrt{\left(\frac{\delta T}{\delta \lambda}\right)^2 \cdot (\Delta \lambda)^2} \\ \Delta T &= \frac{\ln(2)}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda \\ \Delta T &= 1,20 \end{aligned}$$

#### 4.3 Silber

Durch die Messung über eine Zeit von 7 Minuten mit Zeitintervallen von  $\Delta t = 10 \text{ s}$ , bei konstanter Spannung, erhält man folgende Messwerte für die Zählrate von Silber abzüglich der Nullrate:

**Tabelle 3:** Messwerte Silber.

Messzeit $t$ in s	Zählrate $N$	$\Omega_N = \sqrt{N}$ -Fehler
10.0	236.02	15.36
20.0	168.02	12.96
30.0	121.02	11.00
40.0	104.02	10.19
50.0	88.02	9.38
60.0	65.02	8.06
70.0	55.02	7.41
80.0	32.02	5.65
90.0	36.02	6.00
100.0	35.02	5.91
110.0	25.02	5.00
120.0	32.02	5.65
130.0	23.02	4.79
140.0	24.02	4.90
150.0	16.02	4.00
160.0	19.02	4.36
170.0	18.02	4.24
180.0	10.02	3.16
190.0	14.02	3.74
200.0	14.02	3.74
210.0	15.02	3.87
220.0	9.02	3.00
230.0	18.02	4.24
240.0	11.02	3.31
250.0	11.02	3.31
260.0	11.02	3.31
270.0	4.02	2.00
280.0	9.02	3.00
290.0	12.02	3.00
300.0	10.02	3.16
310.0	8.02	2.83
320.0	7.02	2.64
330.0	4.02	2.00
340.0	9.02	3.00
350.0	4.02	2.00
360.0	5.02	2.24
370.0	5.02	2.24
380.0	7.02	2.64
390.0	6.02	2.45
400.0	4.02	2.00
410.0	8.02	2.83
420.0	3.02	1.73



Für die Abbildung 2 wurden die logarithmischen Werte der Zählrate, sowie deren Fehler benötigt. In Tabelle 4 sind diese Werte zu sehen.

**Tabelle 4:** Logarithmische Messwerte Silber.

Messzeit $t$ in s	Zählrate $\ln(N)$	$\ln(N + \Omega_N) - \ln(N)$	$\ln(N) - \ln(N - \Omega_N)$
10.0	5.46	0.06	0.06
20.0	5.12	0.07	0.08
30.0	4.79	0.08	0.09
40.0	4.64	0.09	0.10
50.0	4.47	0.10	0.11
60.0	4.17	0.11	0.13
70.0	4.00	0.12	0.14
80.0	3.46	0.16	0.19
90.0	3.58	0.15	0.18
100.0	3.55	0.15	0.18
110.0	3.21	0.18	0.22
120.0	3.46	0.16	0.19
130.0	3.13	0.18	0.23
140.0	3.17	0.18	0.22
150.0	2.77	0.22	0.28
160.0	2.94	0.20	0.26
170.0	2.89	0.21	0.26
180.0	2.30	0.27	0.37
190.0	2.64	0.23	0.31
200.0	2.64	0.23	0.31
210.0	2.70	0.22	0.29
220.0	2.19	0.28	0.40
230.0	2.89	0.21	0.26
240.0	2.39	0.26	0.35
250.0	2.39	0.26	0.35
260.0	2.39	0.26	0.35
270.0	1.39	0.40	0.69
280.0	2.19	0.28	0.40
290.0	2.48	0.25	0.34
300.0	2.30	0.27	0.37
310.0	2.08	0.30	0.43
320.0	1.94	0.32	0.47
330.0	1.39	0.40	0.69
340.0	2.19	0.28	0.40
350.0	1.39	0.40	0.69
360.0	1.61	0.36	0.59
370.0	1.61	0.36	0.59
380.0	1.94	0.32	0.47
390.0	1.79	0.34	0.52
400.0	1.39	0.40	0.69
410.0	2.08	0.30	0.43
420.0	1.10	0.45	0.85

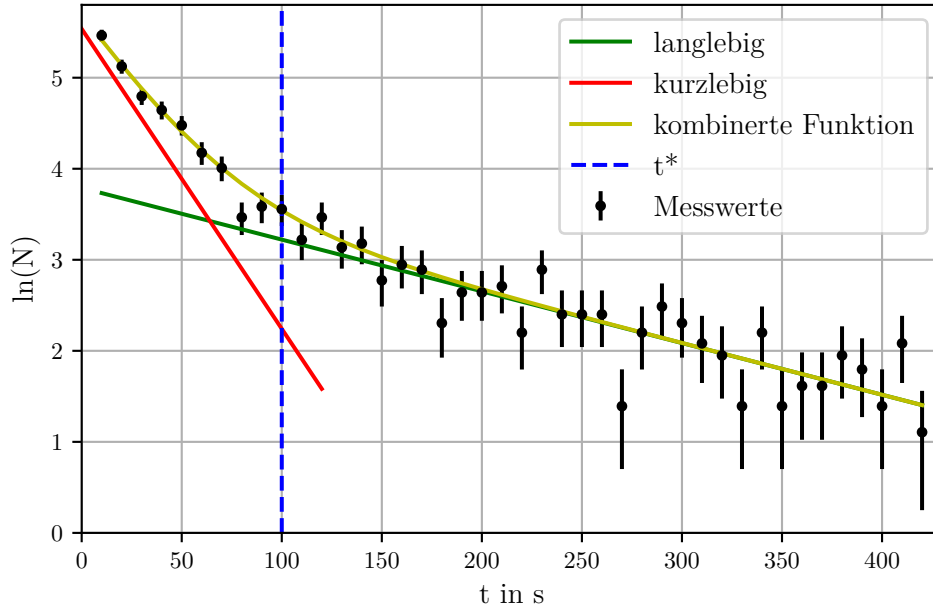


Abbildung 2: Halblogarithmische Zerfallskurve für Silber.

#### 4.3.1 $^{107}\text{Ag}$

Weil Silber aus den zwei Isotopen  $^{107}\text{Ag}$  und  $^{109}\text{Ag}$ , mit verschiedenen Halbwertszeiten besteht, muss vor der Ausgleichrechnung eine Trennung der beiden Bereiche vorgenommen werden. Links vom Punkt  $t^*$  sind noch beide Zerfälle in signifikanter Größe vorhanden und rechts nur noch der Zerfall des langlebigen Isotops  $^{107}\text{Ag}$  mit einer Halbwertszeit von  $T = 142,2\text{s}$  in der Theorie [2].  $t^*$  wird hier durch beobachten des Kurvenverlaufs auf 100s gesetzt. Zur weiteren Auswertung muss erst nur der rechte Bereich mit etwas Abstand zum Punkt  $t^*$  mit einer Ausgleichsgeraden in Abbildung 3 berechnet werden. Dazu wird die Funktion 12 genutzt. In dem Zeitbereich ab 120 s ergeben sich die Werte

$$a = 0.005681 \pm (1,08 \cdot 10^{-4})$$

$$b = 3.790 \pm 0.032$$

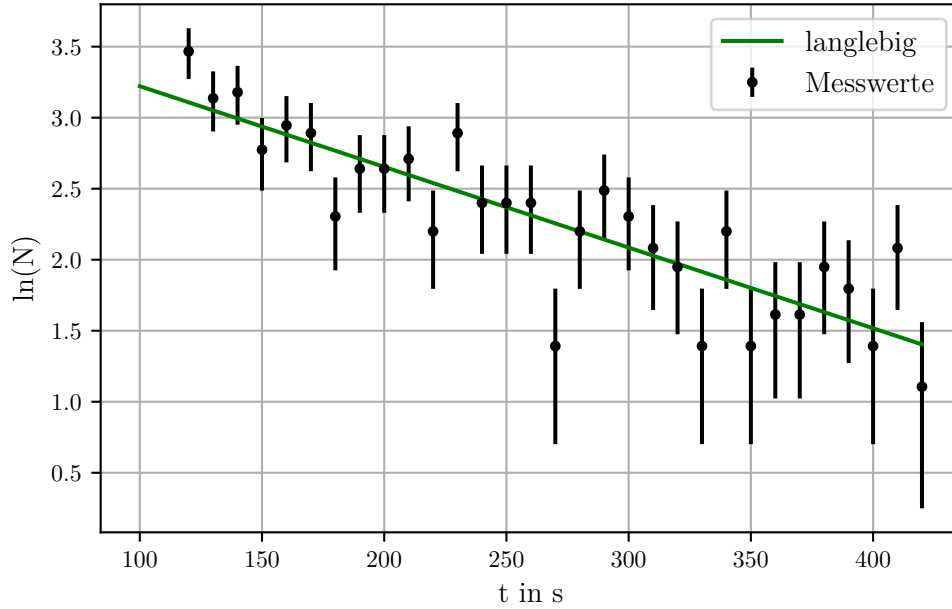
Auch hier ist  $a$  gleich  $\lambda$  und  $b$  ist  $\ln(N_0(1 - e^{-\lambda\Delta t}))$ .

#### 4.3.2 Halbwertszeit $^{107}\text{Ag}$

Mit  $\lambda$  kann nun die Halbwertszeit berechnet werden. Durch einsetzen in die Formel 13 ergibt sich für die Halbwertszeit von  $^{107}\text{Ag}$

$$T = 122,02 \pm 2,30\text{s}$$

Dies entspricht ungefähr einer Zeit von  $t = 2$  Minuten und 2 Sekunden, mit gleicher Unsicherheit. In der Theorie wird ein Wert von  $T = 142,2s$  [2] angegeben. Daraus ergibt sich eine prozentuale Abweichung von ca 14,2 % vom Theoriewert.



**Abbildung 3:** Langlebiger Anteil des Silbers  $^{108}\text{Ag}$ .

#### 4.3.3 $^{109}\text{Ag}$

Zur Auswertung des kurzlebigen Isotops  $^{109}\text{Ag}$ , mit einer Halbwertszeit von  $T = 24,6s$  in der Theorie [2], müssen die Werte

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

von den Zählraten im Bereich  $t < t^*$  abgezogen werden. Es wird der Bereich bis 70 s gewählt. Die neuen Zählraten des kurzlebigen Isotops sind in Tabelle 5 zu sehen.

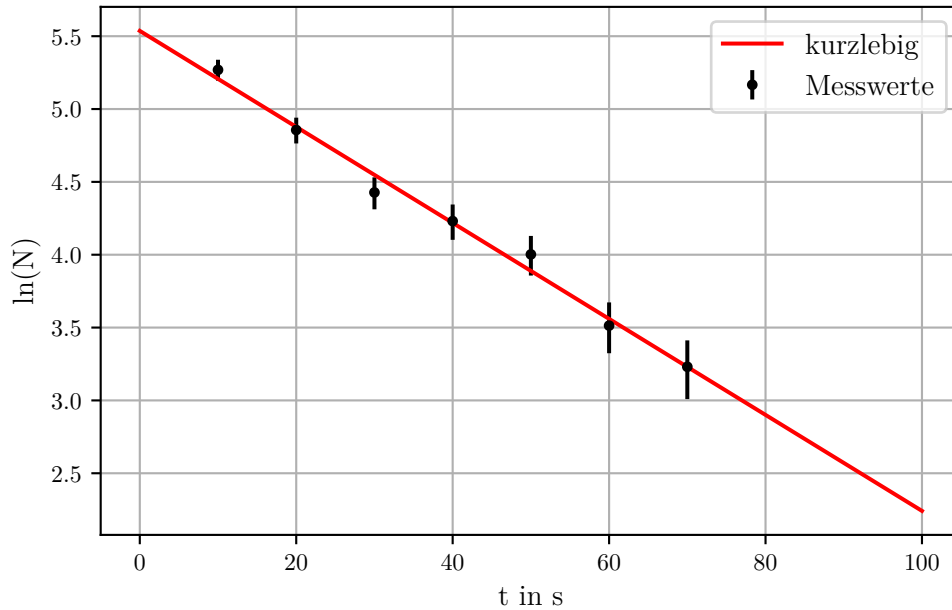
**Tabelle 5:** Messwerte  $^{109}\text{Ag}$ .

Messzeit $t$ in s	Zählrate $N$	$\Omega_N = \sqrt{N}$ -Fehler
10.0	194.2	13.9
20.0	128.5	11.3
30.0	83.7	9.1
40.0	68.7	8.2
50.0	54.7	7.3
60.0	33.5	5.7
70.0	25.2	5.0

Für die Abbildung 4 wurden die logarithmischen Werte der Zählrate, sowie deren Fehler benötigt. In Tabelle 6 sind diese Werte zu sehen.

**Tabelle 6:** Logarithmische Messwerte Silber.

Messzeit $t$ in s	Zählrate $\ln(N)$	$\ln(N + \Omega_N) - \ln(N)$	$\ln(N) - \ln(N - \Omega_N)$
10.0	5.4	0.06	0.07
20.0	5.1	0.08	0.09
30.0	4.7	0.10	0.11
40.0	4.6	0.11	0.12
50.0	4.4	0.12	0.14
60.0	4.1	0.15	0.18
70.0	4	0.18	0.22



**Abbildung 4:** Kurzlebiger Anteil des Silbers  $^{110}\text{Ag}$ .

Hier wird für die Ausgleichsgerade wieder die Formel 12 verwendet, mit den Parametern

$$a = 0,032949 \pm (9,7 \cdot 10^{-5})$$

$$b = 5,54 \pm (4 \cdot 10^{-3})$$

Auch hier ist  $a$  gleich  $\lambda$  und  $b$  ist  $\ln(N_0(1 - e^{-\lambda\Delta t}))$ .

#### 4.3.4 Halbwertszeit $^{109}\text{Ag}$

Mit  $\lambda$  kann nun die Halbwertszeit berechnet werden. Durch einsetzen in die Formel 13 ergibt sich für die Halbwertszeit von  $^{109}\text{Ag}$  zu

$$T = 21,04 \pm 0,06\text{s}$$

In der Theorie wird ein Wert von  $T = 24,6\text{s}$  [2] angegeben. Daraus ergibt sich eine prozentuale Abweichung von ca 14,5 % vom Theoriewert.

Mit den nun beiden bekannten Halbwertszeiten und Faktoren, der kurz- und langlebigen Isotope, kann die Funktion in Abbildung 2 für die kombinierten Bereiche dargestellt werden. Sie hat die Gestalt:

$$e^{b_{kurz}} \cdot e^{-\lambda_{kurz}t} + e^{b_{lang}} \cdot e^{-\lambda_{lang}t} \quad (14)$$

Für die Abbildung 2 wurde nun nur noch der Logarithmus gebildet.

## 5 Diskussion

Durch die hohe Messzeit am Anfang, bei der Bestimmung der Nullrate ist der statistische Fehler sehr klein gehalten. Somit ist dieses Ergebnis mit einer hohen Wahrscheinlichkeit als annähernd genau anzunehmen. In erster Linie folgen alle Messungen dem Zerfallsgesetz und lassen sich durch logarithmische Gerade ausdrücken. Dies bestätigt die Funktionalität des Zählrohrs und der Präparate. Im ersten Versuchsteil mit Indium (Abschnitt 4.2) ist eine Halbwertszeit mit lediglich 1,9% Abweichung vom Theoriewert berechnet worden. Diese Abweichung ist klein genug, um von einem guten Messergebnis zu sprechen. Grund dafür ist die lange Halbwertszeit des Indiums und die entsprechend lange Messreihe. Im Versuchsteil mit Silber sind höhere Abweichungen aufgetreten, mit jeweils ca 14% vom Theoriewert. Die berechneten Werte sind jedoch immernoch in der selben Größenordnung und nah genug am Theoriewert, um von einem funktionierenden Versuch zu reden. Grund für die Abweichungen sind die kurze Halbwertszeit vom kurzlebigen  $^{109}\text{Ag}$ . Bis die Probe in der Haltrung zur Messung angebracht war, sind schon 5-10 Sekunden vergangen. Dies sind 25-50% der Halbwertszeit. Somit wird das genaue Bestimmen der Werte erschwert.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zu V702, Aktivierung mit Neutronen*. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V702.pdf> (besucht am 27.05.2018).
- [2] *Online Periodensystem*. <http://www.periodensystem-online.de>, Mai 2018.