

VERSUCH 702

Aktivierung mit Neutronen

Tabea Hacheney
tabea.hacheney@tu-dortmund.de

Bastian Schuchardt
bastian.schuchardt@tu-dortmund.de

Durchführung: 26.04.2022

Abgabe: 03.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Aktivierung mittels Neutronenbeschuss	3
2.2	Erzeugung niederenergetischer freier Neutronen	4
2.3	β^- -Zerfall und γ -Zerfall	4
2.4	Halbwertszeit	5
3	Durchführung und Aufbau	6
3.1	Aktivierung der Atomkerne durch Neutronenbeschuss	6
3.2	Bestimmung der Halbwertszeit der aktivierten Isotope	7
4	Auswertung	7
4.1	Nullrate	7
5	Halbwertszeit von Vanadium	8
5.1	Halbwertszeiten der Zerfallsprodukte von Silber	9
5.1.1	Halbwertszeit von ^{108}Ag	9
5.1.2	Halbwertszeit von ^{110}Ag	11
6	Diskussion	12
7	Anhang	12
	Literatur	17

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Halbwertszeit T verschiedener instabiler Isotope und Isotopengemische untersucht werden.

2 Theorie

Atomkerne sind instabil, wenn das Verhältnis der Neutronen- und Protonenanzahl außerhalb eines atomspezifischen Stabilitätsbereichs liegt. Dieser Akzeptanzrahmen liegt meistens zwischen 20 und 50% mehr Neutronen als Ordnungszahl Z .

Ein instabiler Atomkern kann mit von Atom zu Atom unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit zu verschiedenen Zerfallsprodukten zerfallen. Diese Zerfallsprodukte können Atome und/oder Teilchen sein.

Da nicht genau vorhergesagt werden kann, ob und wann ein instabiler Kern zerfällt, wird eine andere Größe verwendet, um die Wahrscheinlichkeit eines Zerfalls abschätzen zu können. Der Zeitraum, in dem die Hälfte der vorhandenen instabilen Kerne zerfallen ist, nennt sich Halbwertszeit T .

2.1 Aktivierung mittels Neutronenbeschuss

In diesem Versuch werden Atomkerne mit Neutronen beschossen, um diese in einen angeregten Zustand zu überführen und anschließend deren Zerfälle zu beobachten. Diese angeregten Kerne heißen auch Zwischenkern oder Compoundkern.

Die Neutronen werden von den stabilen Atomkernen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eingefangen, welche vom Wirkungsquerschnitt abhängt. Der Wirkungsquerschnitt σ ist hierbei die Fläche, die ein Kern besitzen müsste, wenn jedes diese Fläche treffende Neutron eingefangen werden würde.

Der Wirkungsquerschnitt wird in $10^{-24} \text{ cm}^2 := 1 \text{ barn}$ angegeben und lässt sich durch die Formel

$$\sigma = \frac{u}{nKd} \quad (1)$$

beschreiben. Dabei ist d die Dicke, K die Anzahl der Atome pro cm^3 , n die Anzahl der Neutronen pro Sekunde und u die Anzahl der Einfänge.

Der Wirkungsquerschnitt für den Neutroneneinfang ist zudem stark abhängig von der Geschwindigkeit der Neutronen und somit dessen kinetischen Energie.

Die Wellenlänge λ des Neutrons ist antiproportional zu dessen Geschwindigkeit v ($\lambda \propto \frac{1}{v}$). Wenn die Geschwindigkeit hoch genug und die Wellenlänge somit klein gegen den Kernradius R ($\approx 10^{-12} \text{ cm}$) ist, können geometrische Überlegungen auf die Wechselwirkung angewendet werden. Bei langsamen Neutronen ($R \leq \lambda$) sind solche Überlegungen durch Interferenzeffekte nicht möglich.

Breit und Wigner haben eine Formel aufgestellt, die den Zusammenhang zwischen

Wirkungsquerschnitt und Neutronenenergie darstellt:

$$\sigma(E) = \sigma_0 \sqrt{\frac{E_{r_i}}{E}} \frac{\tilde{c}}{(E - E_{r_i})^2 + \tilde{c}}. \quad (2)$$

E ist hier die Neutronenenergie, E_{r_i} die Energieniveaus der Zwischenkerne und \tilde{c} und σ_0 sind charakteristische Konstanten.

In der Formel lässt sich ablesen, dass der Wirkungsquerschnitt maximal ist, wenn die Neutronenenergie gleich der Höhe des Energieniveaus des Zwischenkerns ist.

Wenn $E \ll E_r$, dann kann der quadrierte Term in der Formel als konstant angenommen werden und es ergibt sich die Proportionalität

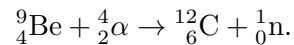
$$\sigma \propto \frac{1}{v}.$$

Somit ist die Einfangswahrscheinlichkeit größer, je kleiner die Energie des Neutrons ist. Daher werden für den Versuch vorzugsweise langsame Neutronen verwendet.

2.2 Erzeugung niederenergetischer freier Neutronen

Neutronen sind als freies Teilchen instabil und zerfallen nach etwa einer Viertelstunde. Daher kommen sie nicht in der Natur vor und müssen während des Versuchs erzeugt werden.

Wenn ${}^9\text{Be}$ -Kerne mit Heliumkernen (α -Teilchen) beschossen werden, wird dieser Kern zu einem Kohlenstoffkern und es wird ein Neutron emittiert:



Die Heliumkerne stammen von dem α -Zerfall von ${}^{226}\text{Ra}$ -Kernen.

Um nun niederenergetische Neutronen zu erhalten, werden diese dazu gezwungen durch dicke Materieschichten aus leichten Atomen hindurch zu diffundieren. Hierbei verlieren die Neutronen durch die elastischen Stöße mit den anderen Teilchen an Energie. Nach dem Gesetz des elastischen Stoßes ist die Energieübertragung umso größer, je kleiner die Massendifferenz der Teilchen ist. Also bietet sich das masseärmste Atom - Wasserstoff - an.

Die Neutronenenergie nähert sich somit der mittleren kinetischen Energie der Moleküle der Umgebung an. Alle Neutronen mit dieser spezifischen Energie und Geschwindigkeit werden als thermische Neutronen bezeichnet.

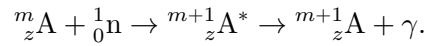
2.3 β^- -Zerfall und γ -Zerfall

Wenn ein stabiler Kern mit einem Neutron beschossen und dieses absorbiert wird, ist die Energie des Compoundkerns um die kinetische Energie und Bindungsenergie des Neutrons höher als die des Ursprungskerns. Diese Energie verteilt sich dann auf alle

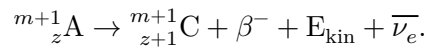
Nukleonen, welche dadurch angeregt werden.

Wenn die Energie des einfallenden Neutrons klein genug ist, bewirkt die Verteilung der Energie im Kern, dass der Compoundkern das eingefallene Neutron oder ein anderes Nukleon nicht abstoßen kann.

Stattdessen geht der Kern durch emittieren eines γ -Quants (γ -Zerfall) nach kurzer Zeit (10^{-16} s) wieder in einen stabileren Zustand über:



Der Compoundkern ist allerdings durch die erhöhte Neutronenanzahl immernoch nicht stabil. Unter Emission eines Elektrons (β^- -Zerfall) geht der instabile Compoundkern in einen stabilen Kern über:



Die entstehende überschüssige Masse wird in kinetische Energie des Elektrons und Antineutrinos umgewandelt.

2.4 Halbwertszeit

Die Zahl $N(t)$ der zum Zeitpunkt t noch nicht zerfallenen Kerne ist durch

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

gegeben. N_0 ist hier die zum Beginn vorhandenen instabilen Kerne und λ die Zerfallskonstante, welche die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Zerfalls beschreibt.

Wie bereits in der Einleitung beschrieben gibt die Halbwertszeit T an, nach welcher Zeit die Hälfte aller instabiler Kerne zerfallen ist. Mit diesem Wissen und der Gleichung 3, lässt sich folgende Formel formulieren:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T}.$$

Durch Umformen ergibt sich dann schließlich

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (4)$$

Durch Messen von $N(t)$ in Abhängigkeit der Zeit könnte λ oder T ermittelt werden. Allerdings ist es sehr schwierig $N(t)$ zuverlässig zu messen.

Daher wird die Anzahl der zerfallenen Kerne $N_{\Delta t}(t)$ in einem Zeitintervall Δt gemessen. Die Größe $N_{\Delta t}(t)$ wird durch die Formel

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

beschrieben. Dieser Ausdruck kann wieder umgeschrieben werden zu

$$\ln N_{\Delta t}(t) = \ln N_0(1 - e^{-\lambda \Delta t}) - \lambda t \quad (5)$$

Durch eine lineare Ausgleichsrechnung, kann mithilfe von Gleichung 5 λ bestimmt werden. Hierbei ist die Wahl des Zeitintervalls wichtig. Bei kleinem Δt wird der statistische Fehler für $N_{\Delta t}(t)$ sehr groß und bei zu großem Δt der statistische Fehler für λ .

3 Durchführung und Aufbau

Die im Versuch verwendete Apparatur besteht aus einem Geiger-Müller-Zählrohr, auf das die aktivierte Probe gesteckt wird. Das Zählrohr ist hierbei dank einer Bleiabschirmung besonders gut von der Umgebungsstrahlung (Nulleffekt) abgeschirmt. Dies ist sehr wichtig, da die Anzahl der einzelnen gemessenen Zerfälle sehr klein sein können.

Die Zählung der Zerfälle erfolgt, nach Signalweitergabe des Zählrohrs, mithilfe eines umschaltbaren Zählwerks, dass jeweils nach einem festlegbaren Intervall zwischen zwei Impulszählern hin und her schaltet, was einfaches Ablesen und eine kontinuierliche Messung ermöglicht.

Der verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 zu sehen.

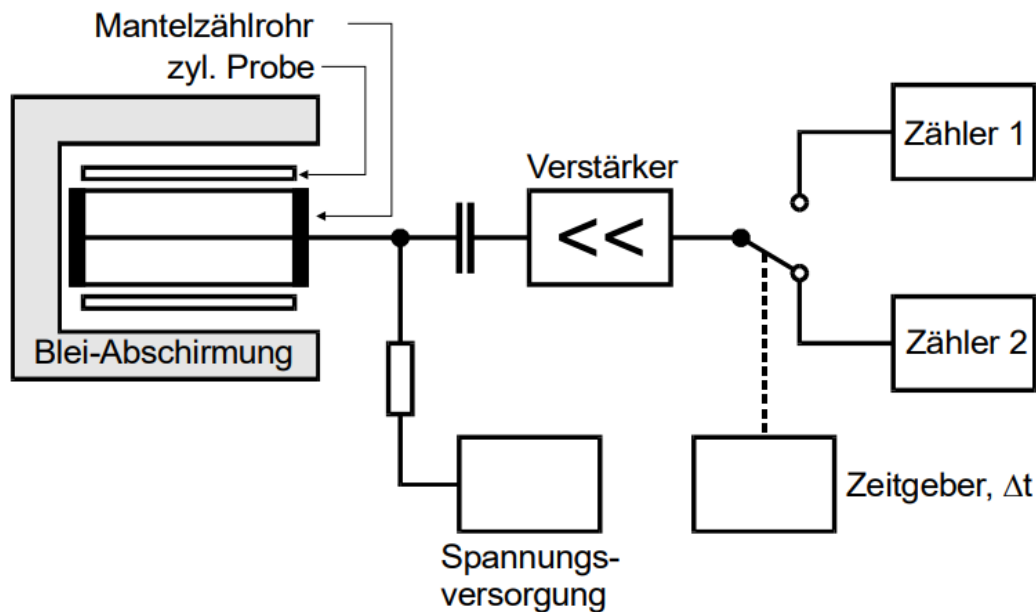


Abbildung 1: Verwendeter Versuchsaufbau zum Zählen der Zerfälle.[2]

3.1 Aktivierung der Atomkerne durch Neutronenbeschuss

Die Proben werden in einer speziellen Apparatur mit langsamen Neutronen beschossen und dadurch aktiviert.

Diese Apparatur ist mit Paraffin (bestehend aus gesättigten Kohlenwasserstoffen) gefüllt, um die durch Kernreaktionen entstandenen Neutronen so stark wie möglich abzubremesen, bevor sie auf die Proben treffen. Die verwendete Apparatur ist in Abbildung 2 dargestellt.

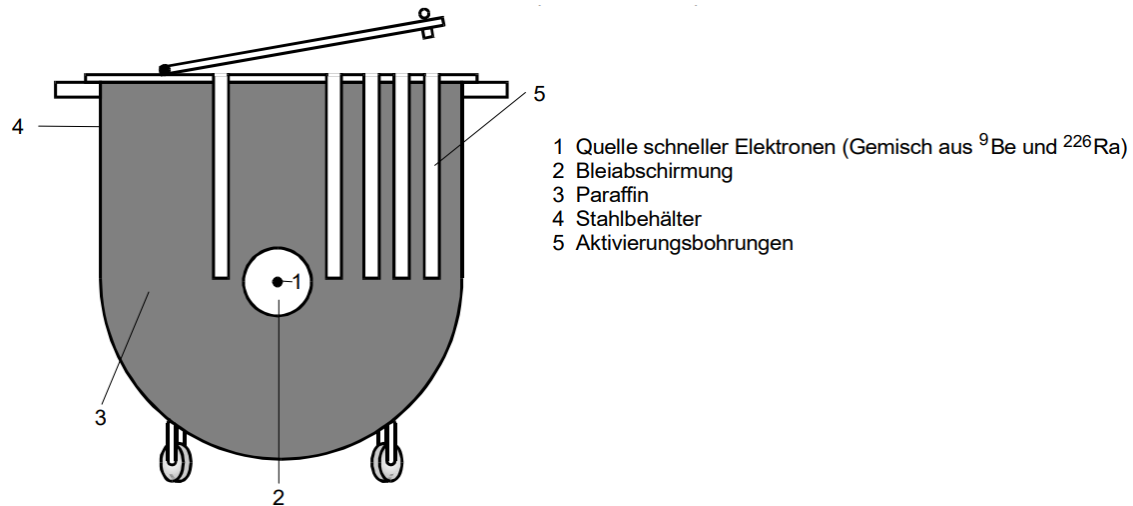


Abbildung 2: Verwendeter Versuchsaufbau zur Aktivierung der Proben.[2]

3.2 Bestimmung der Halbwertszeit der aktivierten Isotope

Zu Beginn wird eine Nullmessung über 500 s durchgeführt, um den Nulleffekt zu bestimmen.

Die aktivierten Proben müssen nach dem Entfernen aus dem Stahlbehälter mit Paraffin so schnell wie möglich in die Messapparatur eingebracht werden, um die Halbwertszeit so genau wie möglich bestimmen zu können.

Es wird jeweils eine Messreihe für das Isotop ^{52}V (Vanadium) und das Isotopengemisch ^{108}Ag und ^{110}Ag (Silber) durchgeführt.

Zuerst werden bei dem Vanadium jeweils 30 Messungen gemacht, welche jeweils 30 Sekunden lang sind. Also wurde das Isotop insgesamt über 15 Minuten hinweg beobachtet. Anschließend werden bei dem Silber 42 Messungen, jeweils zehn Sekunden lang, durchgeführt. Das ergibt hier eine Gesamtzeit von sieben Minuten.

4 Auswertung

4.1 Nullrate

Vor der eigentlichen Messung wird die Nullrate bestimmt. Um den statistischen Fehler möglichst gering zu halten, wird für eine Zeit von $t = 500\text{ s}$ gemessen. Bei dieser Messzeit ergibt sich eine Zählrate von $N = 150$. Die Nullrate bestimmt sich dadurch zu $N_u = 3$ pro 10 s oder zu $N_u = 9$ pro 30 s. Im Folgenden wird die Nullrate immer von den Messwerten abgezogen.

5 Halbwertszeit von Vanadium

Um die Halbwertszeit von Vanadium zu bestimmen, wird die mittlere Zählrate halblogarithmisch gegen die Zeit in Abbildung 3 aufgetragen. Die gemessenen Werte samt des \sqrt{N} -Fehlers sind in Tabelle 1 zu finden. Der Fehler für die gemittelte Zählrate ergibt sich

Messzeit t/s	Zählrate N	Messzeit t/s	Zählrate N
30	131 ± 11	480	28 ± 7
60	116 ± 11	510	19 ± 5
90	122 ± 11	540	29 ± 4
120	88 ± 9	570	28 ± 5
150	91 ± 10	600	19 ± 5
180	72 ± 1	630	9 ± 4
210	81 ± 8	660	22 ± 3
240	63 ± 9	690	13 ± 5
270	58 ± 8	720	12 ± 4
300	40 ± 8	750	12 ± 3
330	57 ± 6	780	12 ± 3
360	36 ± 8	810	12 ± 3
390	40 ± 6	840	6 ± 2
420	40 ± 6	870	9 ± 3
450	49 ± 6	900	5 ± 2

Tabelle 1: Messwerte der Zählrate für Vanadium.

durch die Gaußsche Fehlerforpflanzung, die durch

$$\Delta \bar{N} = \frac{1}{t} \cdot \Delta N$$

gegeben ist. Mit Hilfe von Gleichung 3 lässt sich in halblogarithmischer Darstellung die Gleichung

$$\ln(N(t)) = -\lambda t + \ln N_0$$

aufstellen. Mit Scipy lässt sich nun eine lineare Regression mit den Ergebnissen

$$\lambda_{\text{Vanadium}} = (6,40 \pm 0,28) * 10^{-3} \frac{1}{s}$$

$$\ln(N_{0,\text{Vanadium}}) = 0,49 \pm 0,15$$

durchführen. Aus Gleichung 4 ergibt sich dann für die Halbwertszeit von Vanadium

$$T_{\text{Vanadium}} = (108 \pm 5) s$$

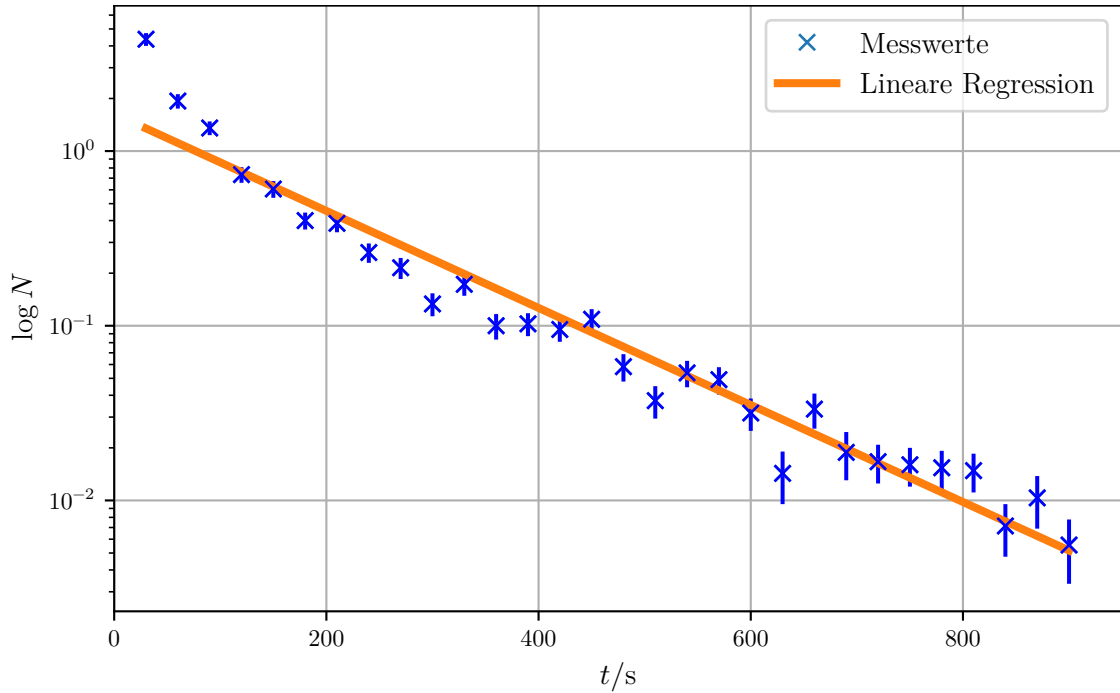


Abbildung 3: Messwerte und lineare Regression für Vanadium.

5.1 Halbwertszeiten der Zerfallsprodukte von Silber

Die Messwerte einschließlich des \sqrt{N} -Fehlers für das Silberpräparat sind in Tabelle 2 zu finden. Es wurde über einen Zeitraum von 420 s in 10 s Intervallen gemessen. Um die Halbwertszeiten von ^{108}Ag und ^{110}Ag zu bestimmen, wird in Abbildung 4 die gemittelte Zählrate halblogarithmisch gegen die Zeit aufgetragen. Um die beiden Zerfälle der Isotope ^{108}Ag und ^{110}Ag zu trennen wird die Messung an einer Stelle $t^* = 120$ s in zwei Bereiche aufgeteilt. Links von t^* sind noch beide Zerfälle vorhanden. Rechts davon nur noch der langlebige Zerfall des Isotops ^{108}Ag .

5.1.1 Halbwertszeit von ^{108}Ag

Aus der linearen Regression ergeben sich für den rechten Bereich

$$\lambda_{^{108}\text{Ag}} = (80,95 \pm 13,46) \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{s}}$$

$$\ln(N_{0,^{108}\text{Ag}}) = 2,54 \pm 0,23.$$

Aus Gleichung 4 ergibt sich für die Halbwertszeit von ^{108}Ag

$$T_{^{108}\text{Ag}} = (86 \pm 14) \text{ s}$$

Messzeit t/s	Zählrate N	Messzeit t/s	Zählrate N
10	156 ± 12	220	18 ± 4
20	143 ± 12	230	13 ± 3
30	106 ± 10	240	9 ± 2
40	85 ± 9	250	23 ± 4
50	67 ± 8	260	12 ± 3
60	42 ± 6	270	9 ± 2
70	57 ± 7	280	11 ± 3
80	36 ± 6	290	11 ± 3
90	42 ± 6	300	16 ± 4
100	30 ± 5	310	9 ± 2
110	29 ± 5	320	9 ± 2
120	21 ± 4	330	20 ± 4
130	28 ± 5	340	6 ± 2
140	21 ± 4	350	6 ± 2
150	34 ± 6	360	10 ± 3
160	10 ± 3	370	4 ± 1
170	14 ± 3	380	21 ± 4
180	17 ± 4	390	16 ± 4
190	13 ± 3	400	12 ± 3
200	13 ± 3	410	6 ± 2
210	19 ± 4	420	11 ± 3

Tabelle 2: Messwerte der Zählrate für Silber

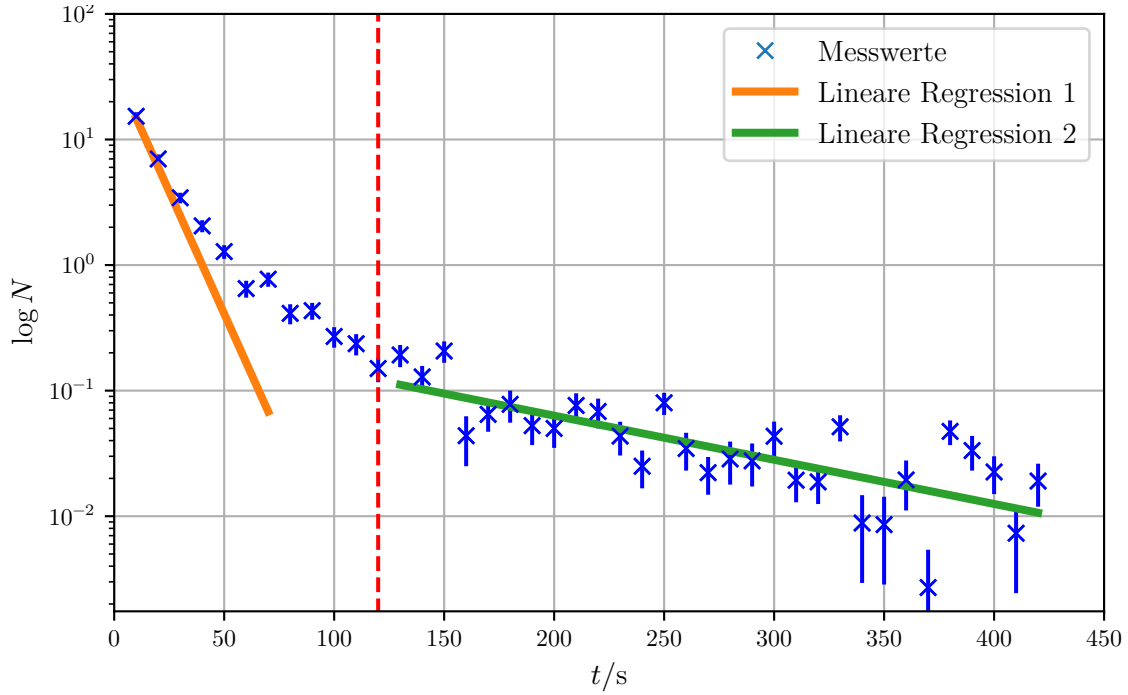


Abbildung 4: Messwerte und zweifache lineare Regression für Silber.

5.1.2 Halbwertszeit von ^{110}Ag

Da ^{110}Ag schneller zerfällt, muss die theoretisch ermittelte Zählrate von ^{108}Ag von den Messwerten abgezogen werden. Die abzuziehende Zählrate lässt sich durch Gleichung 5 bestimmen. Die korrigierten Werte für die lineare Regression ergeben sich aus

$$\begin{aligned} N_{\text{kurz}}(t) &= N_{\text{Ges}}(t) - N_{\text{lang}}(t) \\ &= N_{\text{Ges}}(t) - e^{-mt+b} \end{aligned}$$

Für die lineare Regression ergeben sich die Werte

$$\begin{aligned} \lambda_{^{110}\text{Ag}} &= (89,67 \pm 18,04) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \\ \ln(N_{0,^{110}\text{Ag}}) &= 3,59 \pm 0,81. \end{aligned}$$

wobei diesmal nur t von 0 s bis 80 s betrachtet wird. Daraus ergibt sich eine Halbwertszeit von

$$T_{^{110}\text{Ag}} = (7,7 \pm 1,6) \text{ s}.$$

Der Fehler bestimmt sich durch die Gaußsche Fehlerfortpflanzung durch

$$\Delta T = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{\lambda} \cdot \Delta \lambda.$$

6 Diskussion

Der statistische Fehler der Nullrate ist durch die lange Messzeit sehr gering. Für ^{52}V wurde eine Halbwertszeit von $T_{\text{Vanadium}} = (108 \pm 5)\text{s}$ bestimmt. Der Theoriewert liegt bei $T_{\text{Theorie, Vanadium}} = 224,6\text{s}$ [1]. Daraus folgt eine Abweichung von 108 %. Für ^{108}Ag und ^{110}Ag liegen die Theoriewerte bei $T_{\text{Theorie, }^{108}\text{Ag}} = 142,2\text{s}$ und bei $T_{\text{Theorie, }^{110}\text{Ag}} = 24,6\text{s}$ [1]. Daraus folgen Abweichungen von 219 % und 65 %. Die Abweichungen sind sehr groß. Dies lässt sich dadurch erklären, dass für die Messungen ein großes Messintervall Δt verwendet wurde. Ein kleineres Intervall hätte die Messung wesentlich präziser gemacht. Die Abweichungen für die Halbwertszeiten der Silberpräparate resultieren aus der ungenauen Bestimmung des Zeitpunkts t^* ab dem der längere Zerfall fast ausschließlich vorkommt.

7 Anhang

<u>Dauer</u>	<u>counts</u>	<u>Messung</u>
390	49	13
420	49	14
450	58	15
480	37	16
510	28	17
540	38	18
570	37	19
600	28	20
630	18	21
660	31	22
690	31 22	23
720	21	24
750	21	25
780	21	26
810	21	27
840	15	28

Abbildung 5: Messdaten Teil 1.

Date						
Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
<u>counts</u>						
<u>Messung</u>						
870						
18						
29						
900						
14						
30						
<u>Silber</u>						
jeweils 10 sec.						
10						
156						
1						
20						
143						
2						
30						
106						
3						
40						
85						
4						
50						
67						
5						
60						
42						
6						
70						
57						
7						
80						
36						
8						
90						
42						
9						
100						
30						
10						
110						
29						
11						
120						
21						
12						
130						
28						
13						

Abbildung 6: Messdaten Teil 2.

Memo No. /						
Date /						
Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su
<u>Dauer</u>						
<u>counts</u>						
<u>Messung</u>						
						14
140						15
150						16
160						17
170						18
180						19
190						20
200						21
210						22
220						23
230						24
240						25
250						26
260						27
270						28
280						29
290						30
300						

Abbildung 7: Messdaten Teil 3.

Memo No. _____					
Date _____					
<div> <div> <div>Tu</div> <div>We</div> <div>Th</div> <div>Fr</div> <div>Sa</div> <div>Su</div> </div> <div> <div>☐</div> <div>☐</div> </div> </div>					
<u>Power</u>	<u>counts</u>	<u>Messung</u>			
310	8	31			
320	9	32			
330	20	33			
340	6	34			
350	6	35			
360	10	36			
370	4	37			
380	21	38			
390	16	39			
400	12	40			
410	6	41			
420	11	42			

Abbildung 8: Messdaten Teil 4.

Literatur

- [1] *Online Periodensystem*. URL: <https://www.periodensystem-online.de/> (besucht am 30.04.2022).
- [2] *Versuch 704 Aktivierung mit Neutronen*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2014.