

V702

Aktivierung mit Neutronen

Julian Hochhaus
julian.hochhaus@tu-dortmund.de

Niko Salewski
niko.salewski@tu-dortmund.de

Durchführung: 20.06.2017

Abgabe: 27.06.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Aktivierung mit Neutronen	3
2.2 Erzeugung niederenergetischer Neutronen	4
2.3 Untersuchung des Zerfalls instabiler Isotope	4
3 Durchführung	6
3.1 Versuchsaufbau	6
3.2 Versuchsbeschreibung	6
4 Auswertung	8
4.1 Bestimmung der Zerfallskurve und der Halbwertszeit von Indium	8
4.2 Untersuchung der Halbwertszeit der beiden Zerfälle bei Silber	9
5 Diskussion	14
Literatur	14
6 Anhang	15

1 Zielsetzung

Im vorliegenden Versuch soll die Halbwertszeit instabiler Nuklide untersucht werden. Diese müssen zu Versuchsbeginn zunächst aus stabilen Kernen erzeugt werden. Die Halbwertszeit des Zerfalls der instabilen Nuklide wird schließlich bestimmt über die mittels eines Geiger-Müller-Zählrohrs bestimmte Anzahl an β -Zerfällen.

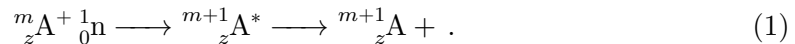
2 Theorie

Die Stabilität eines Atomkerns wird maßgeblich durch das Zahlenverhältnis von Neutronen zu Protonen bestimmt. Liegt die Neutronenzahl etwa um 20 % bis 50 % über der Protonenanzahl, ist der Kern stabil.

Ein Maß für die Zerfallswahrscheinlichkeit ist die Halbwertszeit. Diese ist definiert als die Zeit, nach der genau die Hälfte der Menge der ursprünglich vorhandenen Kerne zerfallen ist. Im vorliegenden Versuch werden sinnigerweise Isotope untersucht, deren Halbwertszeit im Rahmen von einigen Sekunden bis Stunden liegt. So geartete Isotope müssen zunächst allerdings erzeugt werden. Dazu werden stabile Atomkerne mit Neutronen beschossen. Die erzeugten Isotope sind recht instabil, sodass ihre Halbwertszeit im geforderten Zeitrahmen liegt.

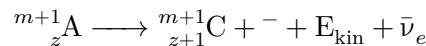
2.1 Aktivierung mit Neutronen

Wechselwirkungen zwischen Teilchen und Kernen werden als Kernreaktionen bezeichnet. Die ablaufende Reaktion bei Beschuss eines Kerns A mit einem Neutron lässt sich wie folgt schreiben:



Wird ein Kern A mit einem Neutron beschossen, entsteht zunächst ein sogenannter **Zwischenkern** A^* , auch **Compoundkern** genannt. Die durch die kinetische Energie und die Bindungsenergie des Neutrons zusätzlich eingebrachte Energie gegenüber dem Kern A wird auf eine große Anzahl an Nukleonen im Kern verteilt. Nach einer kurzen Zeitspanne von $10 \cdot 10^{-16}$ s geht der Zwischenkern unter Emission eines γ -Quants in seinen Grundzustand zurück. Der so erzeugte Kern ${}_Z^{m+1}\text{A}$ hat allerdings ein zusätzliches Neutron gegenüber dem stabilen Isotop, sodass er instabil ist.

Unter Emission eines Elektron geht dieser wieder in einen stabilen Zustand über:



In der Kernphysik ist der Wirkungsquerschnitt σ ein Maß dafür, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Neutron durch einen stabilen Kern eingefangen wird. Nach Breit und Wigner lässt sich der Wirkungsquerschnitt als Funktion der Neutronenenergie E darstellen:

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

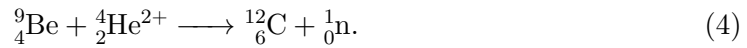
Hierbei stellt E_{r_i} die Energieniveaus des Zwischenkerns \mathbf{A}^* dar und \tilde{c} sowie σ_0 sind für die betreffende Kernreaktion charakteristische Konstanten.

Ist die Summe E aus der kinetischen Energie und der Bindungsenergie des einfallenden Neutrons sehr viel kleiner als die Energieniveaus des Zwischenkerns E_{r_i} , so wird der Nenner des Bruchs im Wirkungsquerschnitt praktisch konstant. Da die Energie E des einfallenden Neutron proportional zu v^2 ist, ergibt sich somit:

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{1}{v}. \quad (3)$$

2.2 Erzeugung niederenergetischer Neutronen

Nach der Überlegung 3 ergibt sich besonders für niederenergetische Neutronen also eine hohe Wahrscheinlichkeit für Neutroneneinfang. Neutronen sind instabil und müssen daher über geeignete Kernreaktionen erzeugt werden. Im vorliegenden Versuch werden hierzu ${}^9\text{Be}$ -Kerne mit α -Teilchen beschossen und hierbei Neutronen freigesetzt:

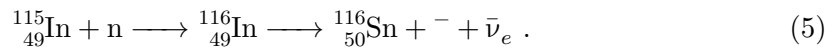


Um die kinetische Energie und damit die Geschwindigkeit der α -Teilchen zu verringern, diffundieren die Neutronen nach dem Austritt aus der Neutronenquelle zunächst durch eine Mantelschicht aus Paraffin. Im Paraffin finden elastische Stöße zwischen den Neutronen und dem Paraffin statt. Durch die elastischen Stöße wird das Neutron recht effektiv gebremst, da die Stoßpartner annähernd gleich groß sind.

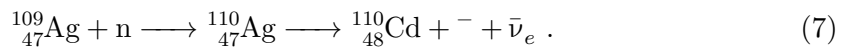
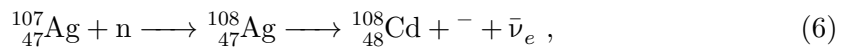
Die Neutronen werden gebremst bis auf eine Energie von etwa 0,025 eV bei $T = 290 \text{ K}$. Sie haben eine mittlere Geschwindigkeit von $\bar{v} = 2,2 \text{ km/s}$. Neutronen mit den genannten Eigenschaften werden als **thermische Neutronen** bezeichnet.

2.3 Untersuchung des Zerfalls instabiler Isotope

Im vorliegenden Versuch wird Indium ${}^{115}_{49}\text{In}$ mit einem einfachen Zerfall und Silber mit zwei parallel ablaufenden Zerfällen untersucht. Für den Zerfall des Indium nach Beschuss mit Neutronen gilt:



Der Zerfall bei Silber stellt sich etwas komplizierter dar. Natürliches Silber besteht nach [4] zu 51,8 % aus dem Isotop ${}^{107}_{47}\text{Ag}$ und zu 48,2 % aus ${}^{109}_{47}\text{Ag}$. Es gelten die Reaktionsgleichungen:



Wird ein Silberblech mittels Neutronenbeschuss aktiviert, so laufen beide Zerfallsprozesse parallel ab. Es ist trotzdem eine Untersuchung der beiden einzelnen Zerfallsprozesse möglich, da die beiden Isotope mit hinreichend verschiedener Halbwertszeit zerfallen.

Nach hinreichend großer Zeitdauer ist das kurzlebige Isotop $^{110}_{47}\text{Ag}$ zerfallen und das langlebige Isotop $^{108}_{47}\text{Ag}$ lässt sich nahezu isoliert beobachten.

Für radioaktive Zerfälle gilt das Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t). \quad (8)$$

Es ist λ die materialspezifische Zerfallskonstante und N_0 die Anzahl der Kerne zu Beginn der Beobachtung.

Nach der Definition der Halbwertszeit ergibt sich diese zu:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 \cdot \exp(-\lambda T_{\frac{1}{2}}) \quad (9)$$

$$\rightarrow T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (10)$$

Die Bestimmung der Halbwertszeit und der Zerfallskonstante über eine Messung der Zeitabhängigkeit der Anzahl an Kernzerfällen $N(t)$ stellt sich als schwierig heraus. Es wird daher die Anzahl $N_{\Delta t}(t)$ an Kernzerfällen in einem festen Zeitintervall Δt bestimmt. Mit der Definition

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

ergibt sich für $N_{\Delta t}(t)$ nach Gleichung (9):

$$N_{\Delta t}(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t) - N_0 \cdot \exp(-\lambda(t + \Delta t)). \quad (11)$$

Wird Gleichung (11) beidseitig logarithmiert, zeigt sich ein linearer Zusammenhang in den Wertepaaren $\{t, \ln N_{\Delta t}(t)\}$:

$$\ln N_{\Delta t}(t) = \ln(N_0(1 - \exp(-\lambda \Delta t))) - \lambda t. \quad (12)$$

Hierbei ist die Wahl eines geeigneten Messintervalls Δt nicht trivial und erfordert langwierige Vorversuche. Eine Liste mit geeigneten Messintervallen liegt daher dem Experiment bei.

Die verschiedenen Zerfälle beim Silber lassen sich wie folgt getrennt untersuchen: Im Zerfalls-Diagramm (vgl. Abbildung 1) ist ein Zeitpunkt t^* so zu wählen, dass für alle $t_i > t^*$ die Zerfallskurve praktisch eine Gerade ist. Für diesen Bereich wird nahezu nur noch der langlebige Zerfall gemessen. In diesem Bereich lässt sich die Zerfallskonstante λ für den langlebigen Zerfall des Isotops $^{108}_{47}\text{Ag}$ bestimmen. Der kurzlebige Zerfall lässt sich untersuchen, indem für $t_i < t^*$ der langlebige Zerfall mit der bereits bestimmten Zerfallskonstante von den gemessenen $N(t)$ abgezogen wird und mit den neu bestimmten $N(t)$ erneut eine lineare Regression nach Gleichung (12) durchgeführt wird.

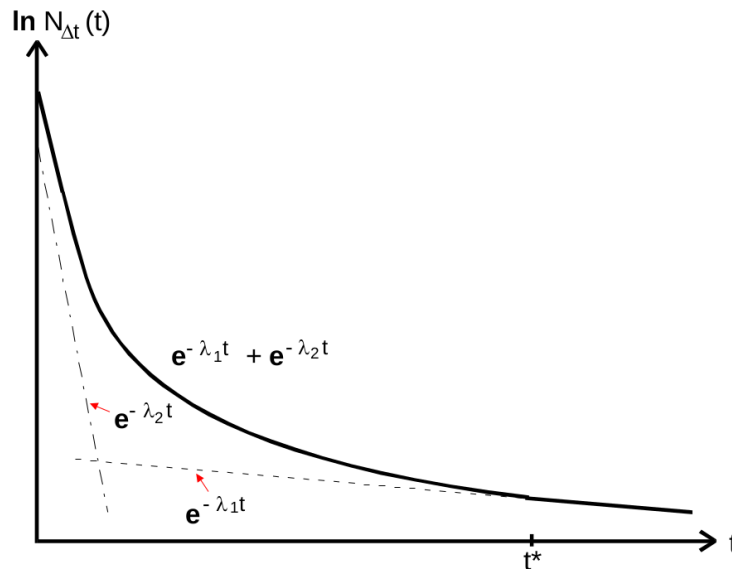


Abbildung 1: Prinzipielle Zerfallskurve eines Materials, welches aus zwei Isotopen mit sehr unterschiedlichen Zerfallskonstanten besteht. [2]

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau – wie in Abbildung 2 dargestellt – besteht im Wesentlichen aus einem zerfallenden radioaktiven Isotop und einem Geiger-Müller-Zählrohr, welches die zerfallenden Kerne misst. Das Geiger-Müller-Zählrohr ist eine mit Gas gefüllte Röhre. Trifft ein β - oder γ - Teilchen auf ein Gasteilchen wird dieses ionisiert und kann aufgrund einer anliegenden Spannung an der Röhre gemessen werden. Dabei werden die gemessenen Zerfälle pro Messzeitintervall, welches am Zeitgeber einstellbar ist, an den Zählern 1 und 2 angezeigt. Nach jedem Messvorgang wird der Zähler umgeschaltet und der vorherige Wert wird auf dem aktuellen Zähler überschrieben. Der Versuchsaufbau ist mit einer Blei-Abschirmung ausgestattet um die radioaktive Strahlung abzuschirmen.

Zur Erzeugung der radioaktiven Isotope wird das Objekt in Abbildung 3 verwendet. Hierbei werden stabile Kerne mit niederenergetischen Neutronen beschossen. Da die Neutronen ihre Energie durch elastische Stöße an die Kerne übergeben und die maximale Energie bei gleichen Massen der Stoßpartner erreicht wird, werden die Neutronen in einem Paraffinmantel gebremst, bis sie die optimale Energie besitzen.

3.2 Versuchsbeschreibung

Vor jeder Messung wird eine Leerlaufmessung – Nullmessung – ohne radioaktives Isotop durchgeführt, bei der die nicht zu vernachlässigenden Zerfälle der Störquellen aufgenommen werden. Diese Messung wird mit einem Messzeitintervall von $\Delta t = 900$ s durchgeführt. Die aufgenommenen Zerfälle bei der Nullmessung werden – angepasst auf das Messzeitin-

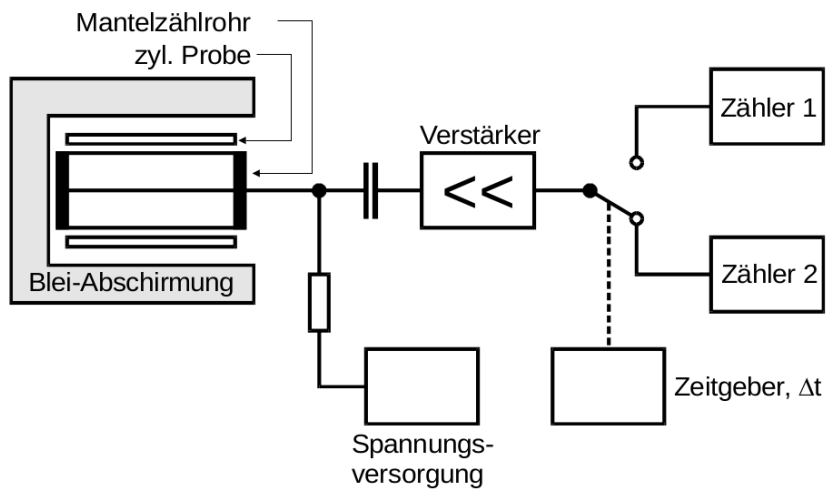


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [2].

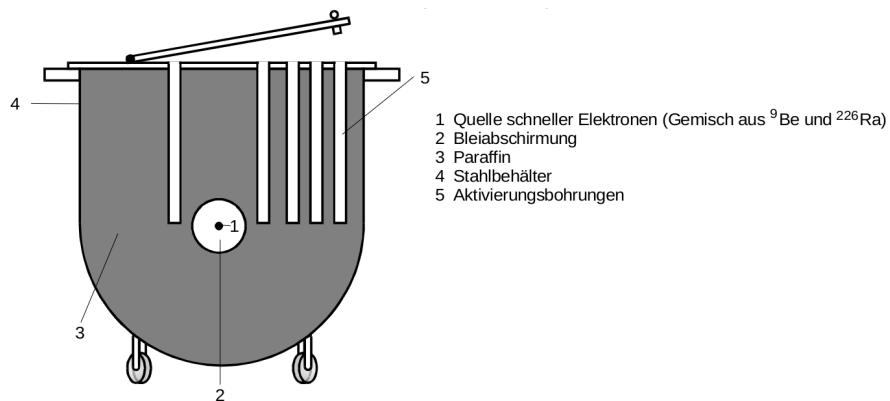


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Quelle zur Erzeugung radioaktiven Isotopen [2].

tervall – von den aufgenommenen Zerfällen mit einem radioaktiven Isotop abgezogen, um den Fehler zu verringern.

Daraufhin wird der Zerfall von ^{116}In gemessen. Hierbei werden 15 Messwerte bei einem Messzeitintervall von jeweils $\Delta t = 240\text{ s}$ aufgenommen.

Zuletzt wird der Zerfall von dem instabilen Isotopengemisch ^{108}Ag und ^{110}Ag gemessen. Diese Messung wird über einen Zeitraum von 8 min durchgeführt, wobei alle $\Delta t = 8\text{ s}$ ein Wert notiert wird.

4 Auswertung

Bei Messungen in der Kernphysik wird für gemessene Werte eine Poisson-Verteilung angenommen. Für gemessene Werte wird daher ein Vertrauensintervall um den gemessenen Wert N von $\sigma = \sqrt{N}$ angenommen. Da im Folgenden die Darstellung logarithmisch gewählt ist, ergeben sich asymmetrische Vertrauensintervalle mit

$$\sigma_{\text{oben}} = \log(N + \sqrt{N}) - \log N, \quad (13)$$

$$\sigma_{\text{unten}} = \log N - \log(N - \sqrt{N}). \quad (14)$$

`abs(np.log(N)-np.log(N-np.sqrt(N)))`

4.1 Bestimmung der Zerfallskurve und der Halbwertszeit von Indium

Die Messdaten zur Bestimmung der Zerfallskurve und Halbwertszeit von Indium sind in Tabelle 1 aufgetragen. Die Messzeit beträgt jeweils $\Delta t = 240\text{ s}$. Weiterhin entspricht die Nullmessung 220 Impulsen bei einer Messzeit von 900 s. Damit werden immer – durch die Übertragung auf die Messzeit $\Delta t = 240\text{ s}$ – 59 Zerfälle abgezogen. Gemäß Formel (9) wird die Anzahl der Zerfälle logarithmiert gegen die Zeit aufgetragen. Nach Formel (12) besteht hier ein linearer Zusammenhang. Eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

$$f(x) = m \cdot x + b$$

mit den Datentupeln $\{t, \ln(N)\}$ aus Tabelle 1 ergibt die Geradenparameter

$$m = (-2,2 \pm 0,8) \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{s}},$$

$$b = 7,80 \pm 0,02.$$

Damit ist die Zerfallskonstante

$$\lambda = (2,2 \pm 0,8) \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{s}}.$$

Die zugehörige Ausgleichsgerade ist in Abbildung 4 dargestellt. Mit Formel (9) ergibt sich die Halbwertszeit von Indium ^{116}In zu

$$T_{\frac{1}{2}} = (3,08 \pm 0,11) \cdot 10^3 \text{ s}.$$

Tabelle 1: Messdaten der Zerfälle N beim Zeitpunkt t zur Bestimmung der Zerfallskurve und Halbwertszeit von Indium.

t / s	N	σ_{oben}	σ_{unten}
240	2517	0,02	0,02
480	2191	0,022	0,021
720	2057	0,022	0,022
960	1925	0,023	0,023
1200	1846	0,024	0,023
1440	1694	0,025	0,024
1680	1642	0,025	0,024
1920	1629	0,025	0,024
2160	1483	0,026	0,026
2400	1397	0,027	0,026
2640	1379	0,027	0,027
2880	1289	0,028	0,027
3120	1232	0,029	0,028
3360	1203	0,029	0,028
3600	1069	0,031	0,03

Der Fehler ergibt sich hierbei –wie für die weiteren Halbwertszeiten auch – über die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung mit der Fehlerformel:

$$\sigma_{T_{\frac{1}{2}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \lambda}\right)^2 \cdot (\Delta \lambda)^2} \quad (15)$$

4.2 Untersuchung der Halbwertszeit der beiden Zerfälle bei Silber

Zu Beginn wird von jeder Anzahl N an gemessenen Zerfällen die Nullmessung abgezogen. Das Messintervall beträgt für die Untersuchung des Zerfalls bei Silber jeweils $\Delta t = 8 \text{ s}$. Die Nullmessung entspricht 220 Impulsen bei einer Messzeit von 900 s. Für das vorliegende Messintervall ergibt sich also ein Wert von

$$N_0 = \frac{220[\text{Imps}]}{900 \text{ s}} \cdot 8 \text{ s} \approx 1.96[\text{Imps}] .$$

Im Anhang in Tabelle 5 finden sich die gemessenen Werte für die Zerfälle abzüglich der Nullmessung, sowie ihr Logarithmus. Es lässt sich ein Zeitpunkt t^* bestimmt, zu dem sich annähernd nur noch der langlebige Zerfall gemessen wird. Es wird $t^* = 168 \text{ s}$ gewählt, da ab diesem Zeitpunkt der Graph bis auf statistische Schwankungen nur noch einen schwach fallenden, annähernd linearen Verlauf aufweist (vgl. dazu Abbildung 5).

Nach Formel (12) besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Zählrate $\ln(N(t))$ und der Messzeit t .

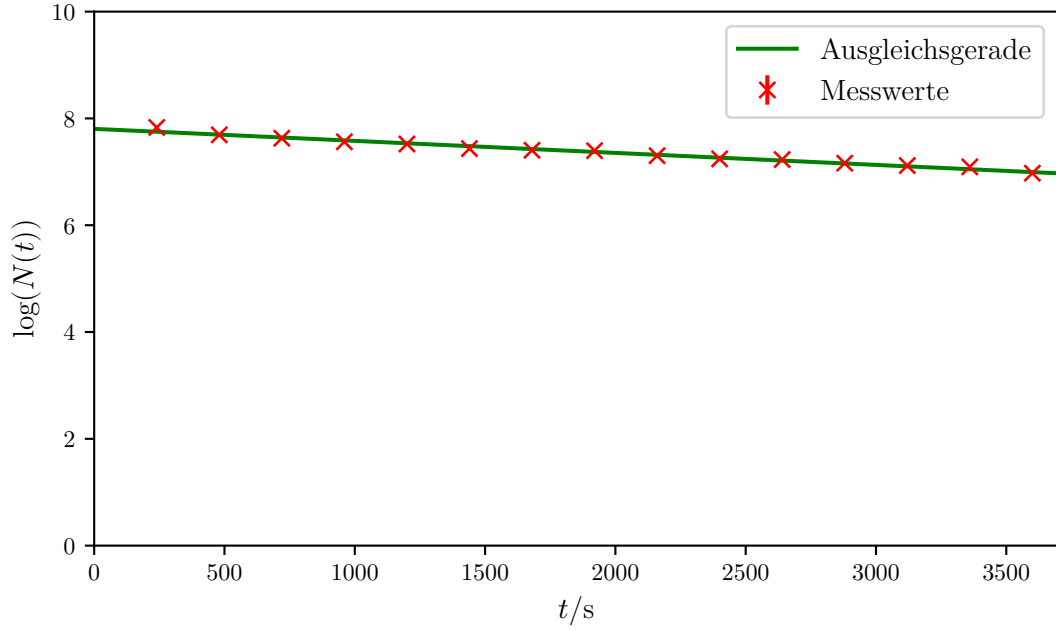


Abbildung 4: Messdaten der logarithmierten Zerfälle N aufgetragen gegen die Zeit t mit zugehöriger Ausgleichsgerade gemäß Formel (9) bzw. Formel (12).

Mittels Python/Scipy [3] wird eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. In Tabelle 2 finden sich die hierfür verwendeten Messzeiten, die zugehörigen Zählraten und deren Logarithmus. Es ergeben sich die Parameter:

$$m_1 = (-0,0061 \pm 0,0013) \frac{1}{\text{s}} = -\lambda_1,$$

$$b_1 = 3,3 \pm 0,4 = \ln(N_0(1 - \exp(-\lambda_1 \Delta t))).$$

Nach Gleichung (9) berechnet sich die Halbwertszeit für den langlebigen Zerfall zu

$$T_{1,2} = (113 \pm 24) \text{ s}. \quad (16)$$

Zur Betrachtung des kurzlebigen Zerfalls des Isotops $^{110}_{47}\text{Ag}$ wird der bereits bekannte langlebige Zerfall von den gemessenen Zerfällen abgezogen. Anschließend wird ebenso wie für den langlebigen Zerfall vorgegangen.

In Tabelle 3 finden sich die hierzu verwendeten Daten. Es ergeben sich die Parameter der Ausgleichsgrade zu:

$$m_k = (-0,0278 \pm 0,0018) \frac{1}{\text{s}} = \lambda_k,$$

$$b_k = 5,11 \pm 0,11 = \ln(N_0(1 - \exp(-\lambda_k \Delta t))).$$

Als Halbwertszeit ergibt sich schließlich:

$$T_{k,\frac{1}{2}} = (25 \pm 2) \text{ s.} \quad (17)$$

In Abbildung 5 sind die Messdaten des gesamten Zerfalls samt Fehlerbalken eingetragen. Für die graphische Darstellung werden Zeiten größer als $t = 416 \text{ s}$ nicht berücksichtigt, da hier Werte kleiner als die Nullmessung gemessen werden, sodass anzunehmen ist, dass hier keine genaue Aussage getroffen werden kann, ob hier jeweils ein tatsächlicher Zerfall der untersuchten Isotope oder lediglich eine Störung gemessen wurde. Zudem werden alle Fehlerbalken, welche unter die Nulllinie im logarithmischen Plot gehen, abgeschnitten, da dies bedeuten würde, dass kein Impuls registriert wird. Dies ist im Rahmen der Messung nicht sinnvoll. In Abbildung 5 sind außerdem die zuvor berechneten Ausgleichsgraden beider Zerfälle eingezeichnet.

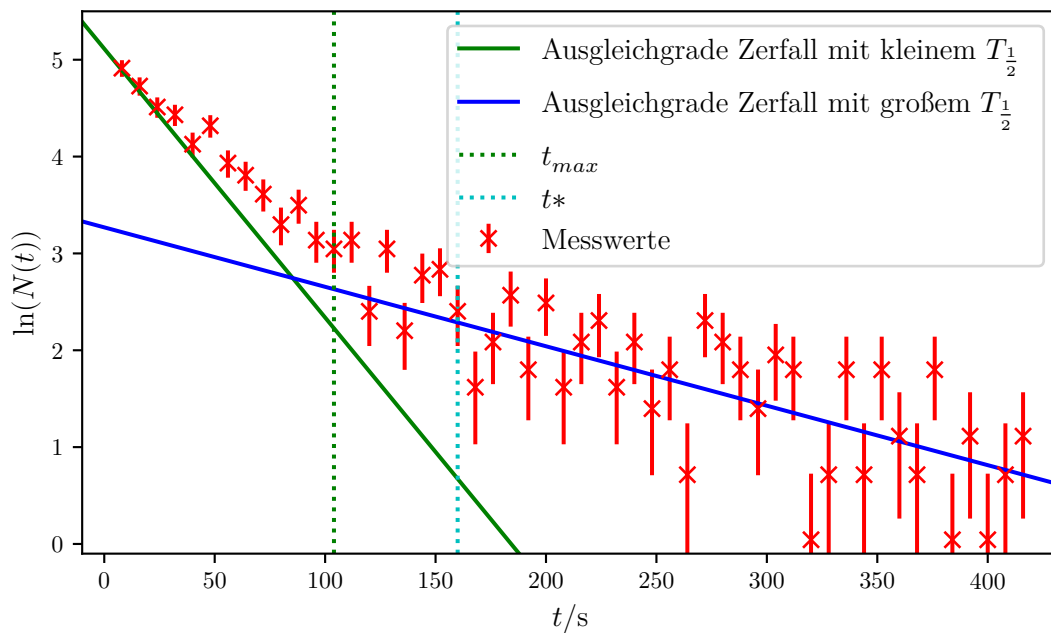


Abbildung 5: Zerfallskurve für Silber samt beider Ausgleichsgraden zur Bestimmung der verschieden ablaufenden Einzelzerfälle.

In Abbildung 6 ist die Summe der beiden errechneten Zerfälle ebenso eingezeichnet, wie die Messwerte samt –analog wie in Abbildung 5 bestimmter – Fehlerbalken. Die Summe beider Zerfälle ist gegeben über die Summe der exponierten Ausgleichsgraden:

$$N(t)_{\Delta t} = \exp(m_k \cdot t + b_k) + \exp(m_l \cdot t + b_l) .$$

Tabelle 2: Messwerte zur Bestimmung der Halbwertszeit des langlebigen Zerfalls für Silber.

t/s	Anzahl der Zerfälle N_1	$\ln N_1$	σ_{unten}	σ_{oben}
168	5	1,618	0,589	0,368
176	8	2,085	0,435	0,302
184	13	2,568	0,324	0,244
192	6	1,799	0,522	0,341
200	12	2,489	0,34	0,253
208	5	1,618	0,589	0,368
216	8	2,085	0,435	0,302
224	10	2,307	0,379	0,274
232	5	1,618	0,589	0,368
240	8	2,085	0,435	0,302
248	4	1,397	0,688	0,404
256	6	1,799	0,522	0,341
264	2	0,715	1,202	0,53
272	10	2,307	0,379	0,274
280	8	2,085	0,435	0,302
288	6	1,799	0,522	0,341
296	4	1,397	0,688	0,404
304	7	1,952	0,473	0,32
312	6	1,799	0,522	0,341
320	1	0,043	3,839	0,682
328	2	0,715	1,202	0,53
336	6	1,799	0,522	0,341
344	2	0,715	1,202	0,53
352	6	1,799	0,522	0,341
360	3	1,113	0,851	0,453
368	2	0,715	1,202	0,53
376	6	1,799	0,522	0,341
384	1	0,043	3,839	0,682
392	3	1,113	0,851	0,453
400	1	0,043	3,839	0,682
408	2	0,715	1,202	0,53
416	3	1,113	0,851	0,453

Tabelle 3: Messwerte zur Bestimmung der Halbwertszeit des kurzlebigen Zerfalls für Silber.

t/s	Anzahl der Zerfälle N	$N_k = N - N_1$	Logarithmus $\ln N_k$	σ_{unten}	σ_{oben}
8	136	123	4,81	0,095	0,086
16	113	100	4,6	0,106	0,095
24	91	78	4,35	0,12	0,107
32	84	71	4,26	0,127	0,112
40	62	49	3,89	0,155	0,134
48	75	62	4,12	0,136	0,12
56	51	38	3,63	0,178	0,151
64	45	32	3,46	0,195	0,163
72	37	24	3,17	0,229	0,186
80	27	14	2,63	0,313	0,238
88	33	20	2,99	0,254	0,202
96	23	10	2,29	0,382	0,276
104	21	8	2,07	0,439	0,304

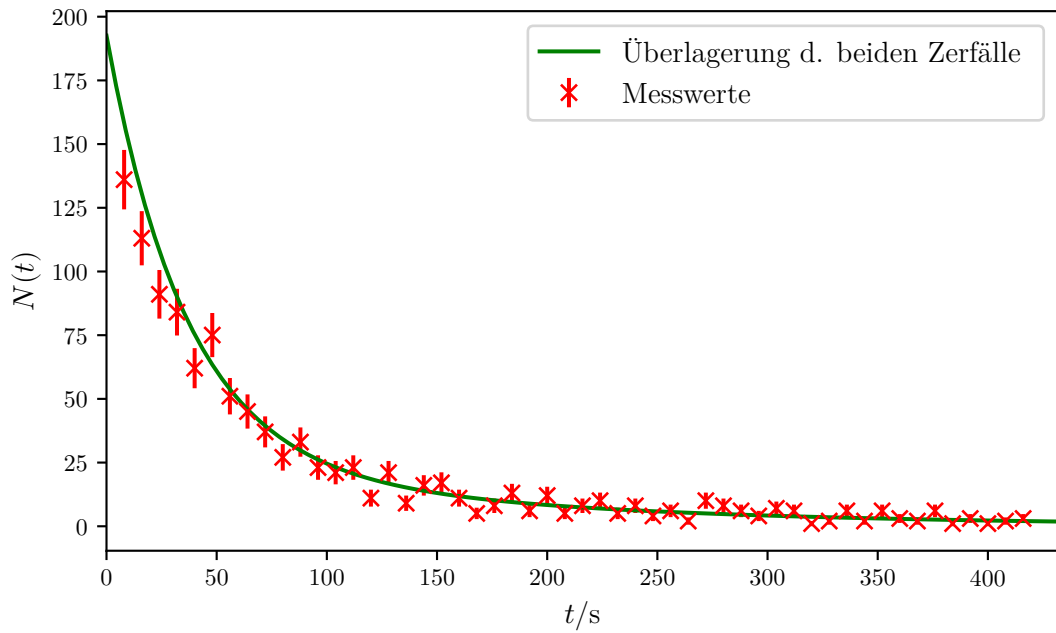


Abbildung 6: Darstellung des mittels Ausgleichsrechnungen ermittelten summierten Zerfalls sowie der im Experiment gemessenen Werte.

5 Diskussion

Bei der Messung des Zerfalls der Silberisotope zeigten sich besonders für große Zeiten t (ab etwa $t = 320$ s) nur noch sehr kleine Anzahlen an registrierten Impulsen. Abzüglich der Nullmessung wurde so häufig nur ein Impuls registriert, für Zeiten größer als $t = 416$ s wird zudem häufig abzüglich der Nullmessung gar kein Impuls mehr gemessen. Zu beachten ist auch, dass der Zerfall der Isotope bereits beginnt, wenn die Probe aus der Quelle der thermischen Neutronen entnommen wird. Theoretisch müssten also noch einige Sekunden auf die Messzeit addiert werden und es würden sich eventuell leicht verschiedene Messergebnisse ergeben. Ein Vergleich der bestimmten Halbwertszeiten mit dem Theoriewert nach [4] und [1] samt der Abweichung findet sich in Tabelle 4. Die recht große Abweichung für die Halbwertszeit des langlebigen Zerfalls des Silber-Isotops $^{108}_{47}\text{Ag}$ lässt sich hierbei mit den bereits genannten Unsicherheiten in der Messung besonders für große Zeiten erklären. Es ist jedoch anzumerken, dass sich für den langlebigen Zerfall ein recht großes Fehlerintervall ergibt, sodass der Literaturwert nur unweit des Fehlerintervalls liegt.

Tabelle 4: Vergleich der Messergebnisse mit den Theoriewerten für die Halbwertszeiten des Zerfalls der gemessenen Isotope.

Isotop	experimentelles Ergebnis $T_{\frac{1}{2}}/\text{s}$	Theoriewert $T_{\frac{1}{2}}/\text{s}$	Abweichung
^{116}In	$(3,08 \pm 0,11) \cdot 10^3$	$3,2574 \cdot 10^3$	5 %
$^{108}_{47}\text{Ag}$	113 ± 24	$142,9 \pm 0,7$	21 %
$^{110}_{47}\text{Ag}$	25 ± 2	$24,56 \pm 0,11$	2 %

Literatur

- [1] *Chart of Nuclides*. URL: <http://www.nndc.bnl.gov/chart/reCenter.jsp?z=50&n=66> (besucht am 25.06.2017).
- [2] TU Dortmund. *Versuch 702, Aktivierung mit Neutronen*. 2016. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V702.pdf> (besucht am 22.06.2017).
- [3] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [4] *Silber-Isotope*. URL: <http://www.internetchemie.info/chemische-elemente/silber-isotope.php> (besucht am 24.06.2017).

6 Anhang

Tabelle 5: Aufgenommene Messwerte des Silberzerfalls abzüglich der Nullmessung.

t/s	Anzahl der Zerfälle $N - N_0$	Logarithmus $\ln N - N_0$
8	136	4.913
16	113	4.728
24	91	4.511
32	84	4.431
40	62	4.128
48	75	4.318
56	51	3.933
64	45	3.808
72	37	3.612
80	27	3.297
88	33	3.498
96	23	3.137
104	21	3.047
112	23	3.137
120	11	2.402
128	21	3.047
136	9	2.202
144	16	2.775
152	17	2.836
160	11	2.402
168	5	1.618
176	8	2.085
184	13	2.568
192	6	1.799
200	12	2.489
208	5	1.618
216	8	2.085
224	10	2.307
232	5	1.618
240	8	2.085
248	4	1.397
256	6	1.799
264	2	0.715
272	10	2.307
280	8	2.085
288	6	1.799
296	4	1.397
304	7	1.952
312	6	1.799

320	1	0.043
328	2	0.715
336	6	1.799
344	2	0.715
352	6	1.799
360	3	1.113
368	2	0.715
376	6	1.799
384	1	0.043
392	3	1.113
400	1	0.043
408	2	0.715
416	3	1.113
424	0	-3.114
432	5	1.618
440	3	1.113
448	-1	—
456	0	-3.114
464	0	-3.114
472	1	0.043
480	3	1.113
