

D702

Aktivierung mit Neutronen

Katharina Popp
katharina.popp@tu-dortmund.de

Nicolai Weitkemper
nicolai.weitkemper@tu-dortmund.de

Abgabe: 02.02.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Neutronen	3
2.2	Zerfall instabiler Isotope	4
2.3	Die Messapparatur	6
3	Durchführung	7
4	Auswertung	8
4.1	Bestimmung der Untergrundrate	9
4.2	Bestimmung der Halbwertszeit von Vanadium	9
4.3	Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium	10
4.3.1	langsamer Zerfall	12
4.3.2	schneller Zerfall	12
5	Diskussion	15
	Literatur	16

1 Zielsetzung

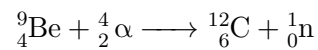
Das Ziel des folgenden Versuches ist es, die Halbwertszeit verschiedener Isotope mithilfe von Neutronenbeschuss zu bestimmen.

2 Theorie

Im Folgenden sollen die theoretischen Grundlagen der Wechselwirkung von Neutronen mit Kernen aufgeführt werden.

2.1 Neutronen

In diesem Versuch werden die Neutronen durch die Reaktion von Berilium-Kernen mit α -Teilchen erzeugt.



Um die entstandenen Neutronen abzubremsen, da besonders die langsameren benötigt werden, werden sie durch Materieschichten, in diesem Fall Paraffin, gelenkt. Dabei kommt es zu elastischen Stößen mit den Atomen der Materie und die Neutronen geben Energie an leichtere Kerne ab. So entstehen thermische Neutronen, mit einer Energie von 0,025 eV bei einer Temperatur von 290 K und einer mittleren Geschwindigkeit von 2,2 km/s.

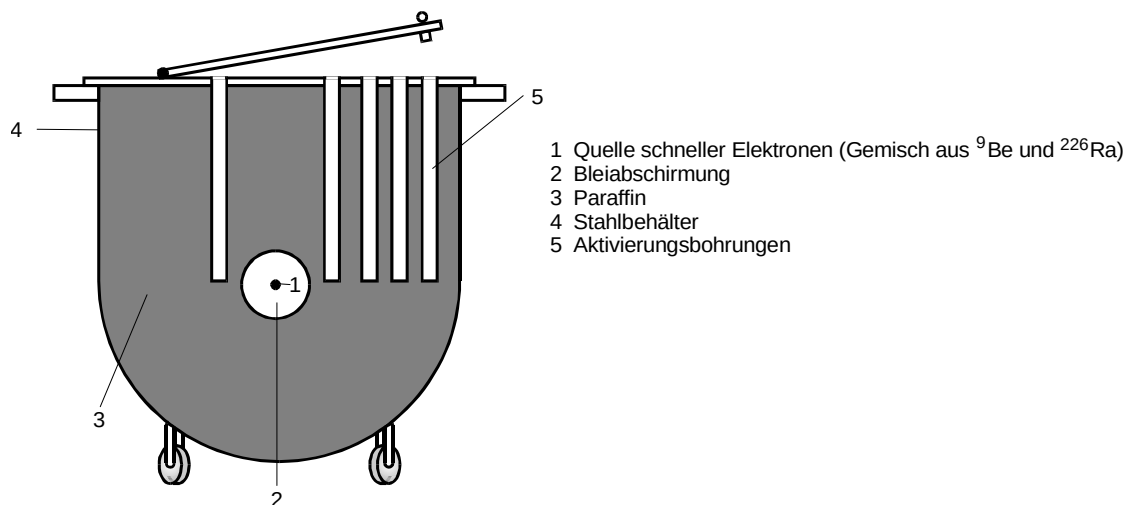
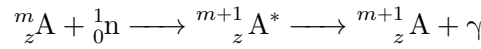


Abbildung 1: Querschnitt durch die hier verwendete Quelle für thermische Neutronen [1].

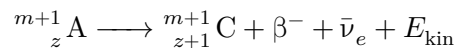
Wenn nun ein Neutron auf einen Kern A trifft, wird es absorbiert, und es entsteht ein Zwischenkern A* mit einer höheren Energie.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Neutron eingefangen wird, wird durch den Wirkungsquerschnitt σ beschrieben, welcher antiproportional zur Geschwindigkeit der Neutronen ist. Je geringer also die Geschwindigkeit der Neutronen ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Kern ein Neutron einfängt.

Nach etwa 10^{-16} s geht der Kern wieder in seinen Grundzustand über; die überschüssige Energie wird dabei in Form eines γ -Quants ausgestoßen.



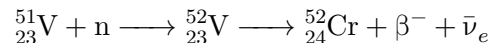
Aufgrund des zusätzlichen Neutrons ist der Zwischenkern allerdings nicht stabil, sondern zerfällt in einen stabilen Kern ${}_{z+1}^{m+1}\text{C}$ unter Emission eines Elektrons und eines Elektron-antineutrinos, auf die die überschüssige Masse des Kerns ${}_{z+1}^{m+1}\text{A}^*$ in Form von kinetischer Energie aufgeteilt wird.



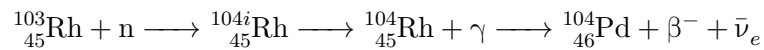
2.2 Zerfall instabiler Isotope

Es werden die Isotope ${}^{51}\text{V}$ und ${}^{103}\text{Rh}$ untersucht. Dazu werden die Präparate in die Aktivierungsbohrungen der Neutronenquelle gebracht (siehe Abbildung 1).

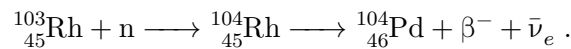
Der Zerfall von Vanadium wird durch



beschrieben, während der Zerfall von Rhodium eine Besonderheit aufweist. Wenn ein Neutron auf das Rhodium-Isotop trifft, findet mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % der Zerfall



statt, und gleichzeitig, mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 %, der Zerfall



Die Halbwertszeiten der beiden Zerfälle sind dabei unterschiedlich, können aber bestimmt werden, da die Kerne, die beim weiteren Zerfall von ${}_{45}^{104i}\text{Rh}$ entstehen, zwar detektiert werden, aber in der Gesamtzahl keinen signifikanten Einfluss haben.

Um nun die Halbwertszeit $T_{1/2}$ zu bestimmen, wird die Zahl der zur Zeit t noch nicht zerfallenen Kerne durch das Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

beschrieben, wobei N_0 die Zahl der Kerne zum Zeitpunkt $t = 0$ ist und λ die Zerfallskonstante. Die Halbwertszeit ist die Zeit, zu der nur noch die Hälfte der Kerne in der Probe vorhanden sind, also

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} .$$

Daraus folgt

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

Da $N(t)$ schwierig zu bestimmen ist, wird die Anzahl der Kerne in einem festen Intervall Δt gemessen, wobei dieses durch Vorversuche festgelegt werden muss, da bei einem zu großen Intervall systematische Fehler bei λ auftreten, während bei einem zu kleinen Intervall statistische Fehler für $N_{\Delta t}(t)$ entstehen.

Für die Anzahl der Kerne in diesem Intervall gilt

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

Somit ergibt sich für das Zerfallsgesetz

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

Um die Zerfallsrate des Rhodium-Isotops zu berechnen, kann eine Zeit t^* festgelegt werden, welche größer als die obere Zeitgrenze t_{\max} für die Berechnung von $N_{\Delta t, \text{kurz}}$ ist. Ab dieser Zeit t^* ist nur noch der langlebigere Zerfall relevant. Die Zählrate des kurzlebigeren Zerfalls kann durch $N_{\Delta t}(t_i) - N_{\Delta t, \text{lang}}(t_i)$ berechnet werden.

Voraussetzung für eine zuverlässige Berechnung von $N_{\Delta t, \text{lang}}(t^*)$ und $N_{\Delta t, \text{kurz}}(t^*)$ ist, dass

$$N_{\Delta t, \text{lang}}(t_i) \gg N_{\Delta t, \text{kurz}}(t_i)$$

gilt, damit beide Zerfälle gut voneinander unterscheidbar sind und eine unabhängige Berechnung möglich ist.

2.3 Die Messapparatur

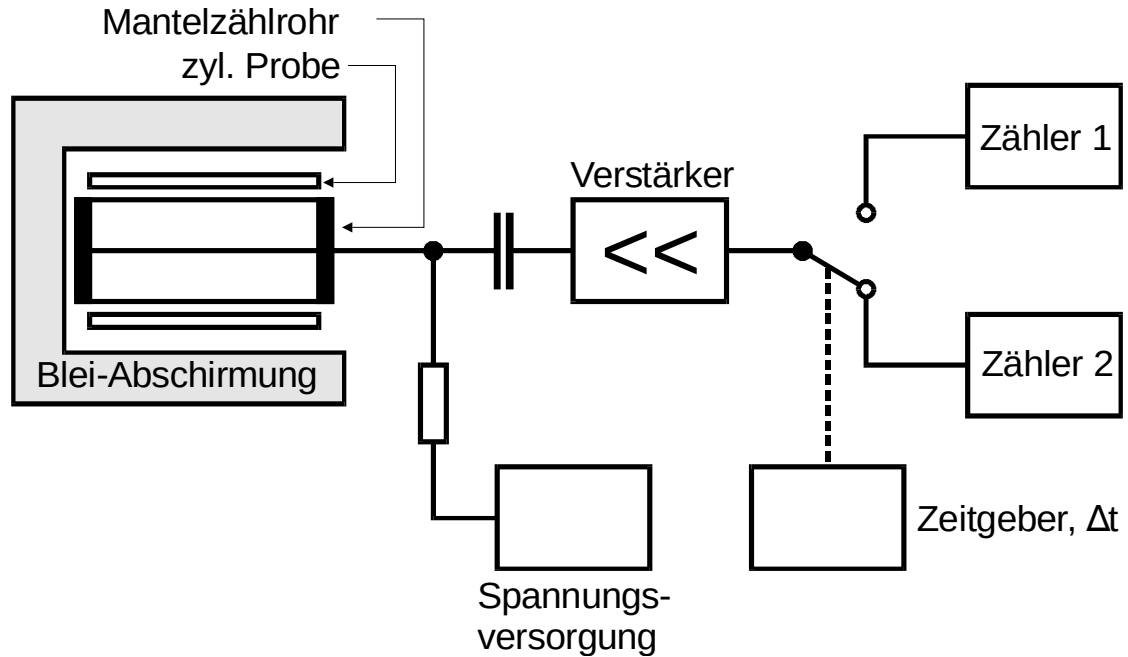


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [1].

Beim Zerfall der Proben entstehen β^- - und γ -Teilchen, welche mit einem Geiger-Müller-Zählrohr gemessen werden können. Diese Teilchen lösen im Inneren des Zählrohrs elektrische Impulse aus, welche zu einem elektrischen Zählwerk geleitet werden. Dieses misst über einen Zeitraum von Δt und schaltet in einer Zeit von 100 ns auf ein weiteres Zählwerk um, welches nach einem weiteren Zeitraum Δt zurück zum ersten Zählwerk umschaltet, sodass über einen sehr langen Zeitraum genau gemessen und bequem abgelesen werden kann.

Das Geiger-Müller-Zählrohr ist von einem Block aus Blei umgeben, welcher den Einfluss von Höhenstrahlung und natürlicher Radioaktivität minimieren soll. Die endliche Zählrate, die trotzdem schon vor dem Einfügen der Probe gemessen wird, wird Nulleffekt N_U genannt. Um diesen besonders genau zu bestimmen, wird vor Einfügen der Probe über einen möglichst langen Zeitraum gemessen.

Für die Zählrate ergibt sich

$$N_{\Delta t}(t_i) = N_{\Delta t, \text{gem}}(t_i) - N_{\Delta t, u} , \quad (3)$$

mit der über Δt gemessenen Zählrate $N_{\Delta t, \text{gem}}$ und der Zählrate des Nulleffekts $N_{\Delta t, u}$.

3 Durchführung

Zu Beginn des Versuches wird der Wert der Untergrundrate des Nulleffekts N_U mehrfach gemessen, in einem Zeitintervall von $\Delta t = 300\text{ s}$. Die empfohlene „Mindest-Gesamt-Messzeit“ der Untergrundrate von 600 s wurde mit umgerechnet $7 \cdot 300\text{ s} = 35\text{ min}$ eingehalten.

Die Isotopen-Proben sollten kurz vor Beginn der Messung hergestellt werden, damit möglichst wenige Kerne schon vorher zerfallen.

Zur Bestimmung der Halbwertszeit von Vanadium wird die Probe in den Aktivierungsschacht der Neutronenquelle in Abbildung 1 gebracht und anschließend auf das Geiger-Müller-Zählrohr in Abbildung 2 gesteckt. Es wird etwa 20 min lang gemessen. Für die Messung wird ein Zeitintervall von $\Delta t = 30\text{ s}$ eingestellt. Die Zählrate wird mithilfe der Gleichung 3 bestimmt.

Für die Messung der Rhodium-Probe wird das Vorgehen wiederholt, diesmal mit einem Zeitintervall von $\Delta t = 15\text{ s}$. Es wird etwa 10 min lang gemessen. Die Zählrate wird wieder mithilfe der Gleichung 3 bestimmt.

Die Halbwertszeit der beiden Isotope kann mit Gleichung 2 berechnet werden.

4 Auswertung

Im Folgenden sollen auf Basis der aufgenommenen Messwerte die Halbwertszeiten von aktiviertem Vanadium und Rhodium bestimmt werden. Die nachstehenden Messwerte wurden nicht bearbeitet und beinhalten daher insbesondere die Untergrundrate. Diese wurde in Unterabschnitt 4.1 bestimmt und anschließend ohne weitere Erwähnung von den Messwerten subtrahiert.

Tabelle 1: Übersicht der für Vanadium aufgenommenen Messwerte [2].

t / s	$N / \text{Imp}/30s$	t / s	$N / \text{Imp}/30s$
30	$189 \pm 13,7$	690	$35 \pm 5,9$
60	$197 \pm 14,0$	720	$19 \pm 4,4$
90	$150 \pm 12,2$	750	$28 \pm 5,3$
120	$159 \pm 12,6$	780	$27 \pm 5,2$
150	$155 \pm 12,4$	810	$36 \pm 6,0$
180	$132 \pm 11,5$	840	$25 \pm 5,0$
210	$117 \pm 10,8$	870	$29 \pm 5,4$
240	$107 \pm 10,3$	900	$18 \pm 4,2$
270	$94 \pm 9,7$	930	$17 \pm 4,1$
300	$100 \pm 10,0$	960	$24 \pm 4,9$
330	$79 \pm 8,9$	990	$21 \pm 4,6$
360	$69 \pm 8,3$	1020	$25 \pm 5,0$
390	$81 \pm 9,0$	1050	$21 \pm 4,6$
420	$46 \pm 6,8$	1080	$24 \pm 4,9$
450	$49 \pm 7,0$	1110	$25 \pm 5,0$
480	$61 \pm 7,8$	1140	$17 \pm 4,1$
510	$56 \pm 7,5$	1170	$20 \pm 4,5$
540	$40 \pm 6,3$	1200	$19 \pm 4,4$
570	$45 \pm 6,7$	1230	$20 \pm 4,5$
600	$32 \pm 5,7$	1260	$18 \pm 4,2$
630	$27 \pm 5,2$	1290	$16 \pm 4,0$
660	$43 \pm 6,6$	1320	$17 \pm 4,1$

Tabelle 2: Übersicht der für Rhodium aufgenommenen Messwerte [2].

t / s	$N / \text{Imp}/15s$	t / s	$N / \text{Imp}/15s$
15	$667 \pm 25,8$	345	$36 \pm 6,0$
30	$585 \pm 24,2$	360	$38 \pm 6,2$
45	$474 \pm 21,8$	375	$34 \pm 5,8$
60	$399 \pm 20,0$	390	$40 \pm 6,3$
75	$304 \pm 17,4$	405	$21 \pm 4,6$
90	$253 \pm 15,9$	420	$35 \pm 5,9$
105	$213 \pm 14,6$	435	$33 \pm 5,7$
120	$173 \pm 13,2$	450	$36 \pm 6,0$
135	$152 \pm 12,3$	465	$20 \pm 4,5$
150	$126 \pm 11,2$	480	$24 \pm 4,9$
165	$111 \pm 10,5$	495	$30 \pm 5,5$
180	$92 \pm 9,6$	510	$30 \pm 5,5$
195	$79 \pm 8,9$	525	$26 \pm 5,1$
210	$74 \pm 8,6$	540	$28 \pm 5,3$
225	$60 \pm 7,7$	555	$23 \pm 4,8$
240	$52 \pm 7,2$	570	$20 \pm 4,5$
255	$56 \pm 7,5$	585	$28 \pm 5,3$
270	$53 \pm 7,3$	600	$17 \pm 4,1$
285	$41 \pm 6,4$	615	$26 \pm 5,1$
300	$36 \pm 6,0$	630	$19 \pm 4,4$
315	$37 \pm 6,1$	645	$13 \pm 3,6$
330	$32 \pm 5,7$	660	$17 \pm 4,1$

4.1 Bestimmung der Untergrundrate

Zur Bestimmung der Untergrundrate N_U wurden mehrere Messungen über ein Messintervall $t = 300\text{ s}$ durchgeführt:

$$N_U = \{129, 143, 144, 136, 139, 126, 158\}$$

$$\overline{N_U} = (139 \pm 4) / 300\text{ s} = (0,464 \pm 0,013) \frac{1}{\text{s}}$$

4.2 Bestimmung der Halbwertszeit von Vanadium

In Abbildung 3 sind die Messwerte und zwei Fit-Funktionen dargestellt, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Die grau gestrichelten Linien markieren die Halbwertszeit und die doppelte Halbwertszeit, die aus dem ersten Fit ermittelt wurden.

Hier wurde der Fit durch Anpassung des Zerfallsgesetzes bestimmt, unter Zuhilfenahme von *scipy*.

Die folgenden Parameter wurden berechnet:

$$N_{0, \text{ fit}} = (6,964 \pm 0,185) \frac{1}{\text{s}}$$

$$\lambda_{\text{fit}} = (0,003\,42 \pm 0,000\,12) \frac{1}{\text{s}}$$

Daraus ergibt sich eine (ungefähre) Halbwertszeit von

$$T_{1/2} = (203 \pm 7) \text{ s} .$$

Unter Verwendung dieser wurde ein zweiter Fit berechnet, der nur auf den Messwerten bis zur doppelten (ungefähren) Halbwertszeit beruht, um die aus dem Übergang in den Untergrund resultierende Ungenauigkeit auszulassen.

$$N_{0, \text{ fit}} = (7,289 \pm 0,530) \frac{1}{\text{s}}$$

$$\lambda_{\text{fit}} = (0,003\,58 \pm 0,000\,20) \frac{1}{\text{s}}$$

Die genauere Halbwertszeit beträgt somit

$$T_{1/2, \text{ fit}} = (194 \pm 11) \text{ s} .$$

4.3 Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium

Die Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium gliedert sich in mehrere Schritte auf, da Rhodium zwei unterschiedlich schnelle Zerfallskanäle besitzt (siehe Unterabschnitt 2.2). In Abbildung 5 ist daher ein „Knick“ in den Messwerten erkennbar (gestrichelte Linie bei 240 s), nach welchem nur noch der langlebige Zerfall einen signifikanten Beitrag zur Zählrate leistet.

Zunächst sei hier eine kurze Herleitung der benutzten Regression angegeben:

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

$$\ln \left(\frac{N(t)}{N_0} \right) = -\lambda t$$

$$\ln N(t) = \underbrace{(-\lambda)}_{\text{Steigung}} t + \underbrace{\ln N_0}_{\text{Achsenabschnitt}}$$

Die Halbwertszeit berechnet sich dann gemäß Gleichung 2.

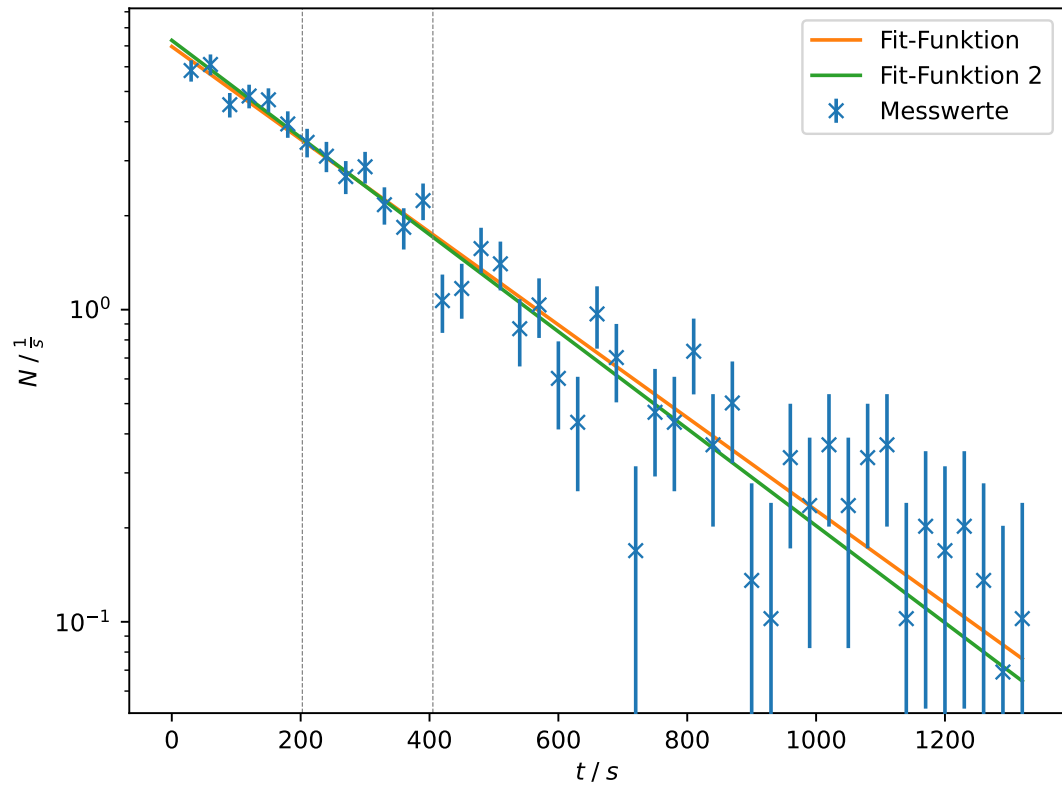


Abbildung 3: Halblogarithmische Darstellung der berechneten Zählraten und Fits zu Vanadium.

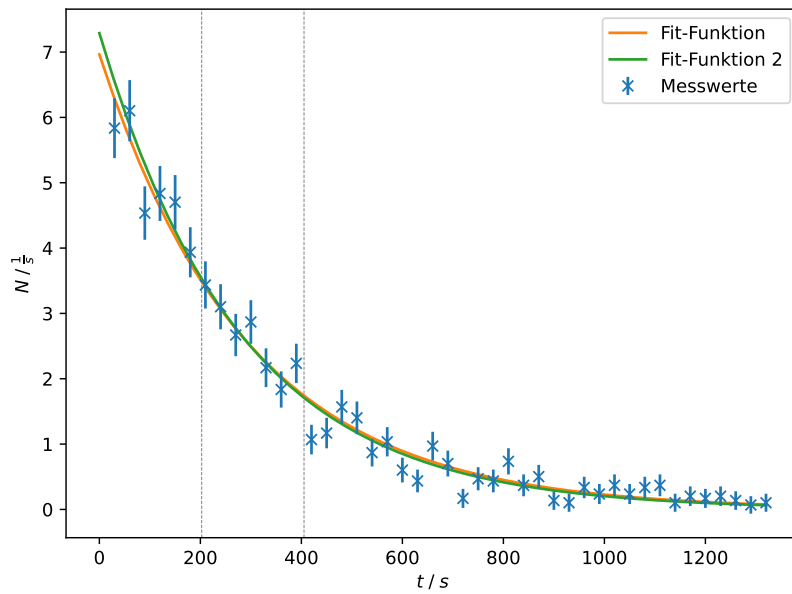


Abbildung 4: Lineare Darstellung der berechneten Zählraten und Fits zu Vanadium.

4.3.1 langsamer Zerfall

Um die Zerfallskonstante λ_{langsam} für den langsamen Zerfall zu bestimmen, wurde $\ln N(t)$ gegen die Zeit t aufgetragen und eine Regressiongerade (orangene Gerade in Abbildung 5) für die Zeit nach 240 s berechnet. Die Parameter der Regressiongerade $\ln N_{\text{langsam}} = mt + n$ sind

$$m = -0.00327 \pm 0.0004$$

$$n = 1.839$$

und somit

$$\lambda_{\text{langsam}} = (0,003\,27 \pm 0,000\,40) \frac{1}{\text{s}}$$

$$T_{1/2, \text{langsam}} = (212 \pm 26) \text{ s} .$$

4.3.2 schneller Zerfall

Um die Zerfallskonstante des schnelleren Zerfalls zu bestimmen, wird die zugehörige Zählrate isoliert, indem aus der Fortsetzung der Fit-Funktion $\ln N_{\text{langsam}}$ (orange) die Zählrate N_{langsam} durch Exponentiation ermittelt und diese von der gemessenen Zählrate

subtrahiert wird, woraufhin erneut der Logarithmus angewandt wird. Das Ergebnis ist $\ln N_{\text{schnell}}$ (rot).

Auch hierfür wurde eine Regressionsrechnung durchgeführt. Dabei ergaben sich die Parameter

$$m = -0.0190 \pm 0.0007$$

$$n = 4.137$$

und somit

$$\lambda_{\text{schnell}} = (0,0190 \pm 0,0007) \frac{1}{\text{s}}$$

$$T_{1/2, \text{ schnell}} = (36,5 \pm 1,4) \text{ s} .$$

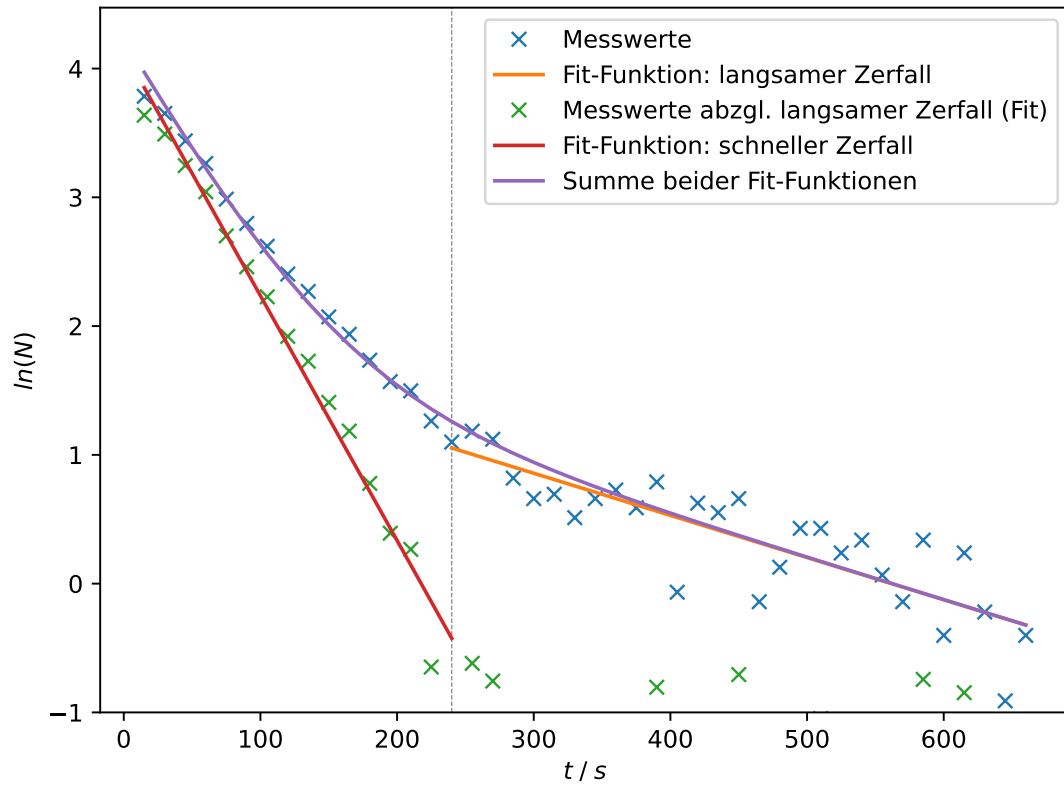


Abbildung 5: Halblogarithmische Darstellung der berechneten Zählraten und Fits zu Rhodium.

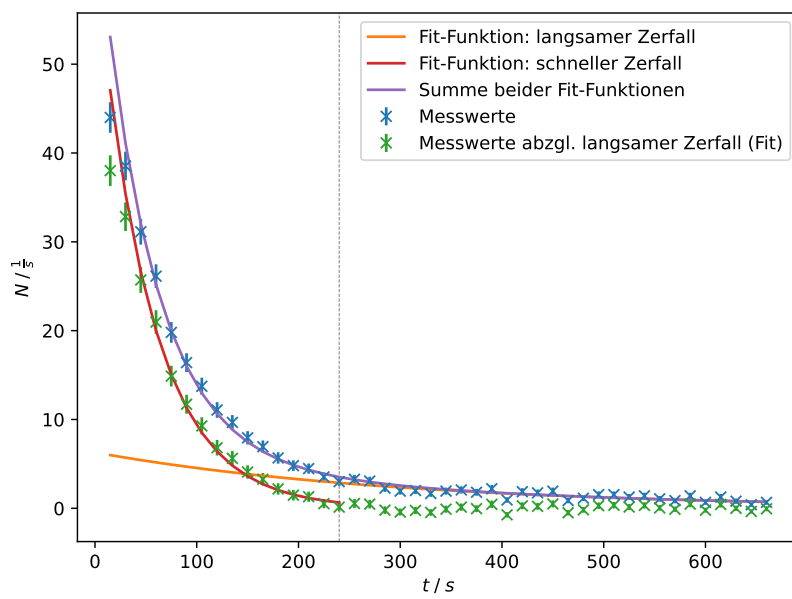


Abbildung 6: Lineare Darstellung der berechneten Zählraten und Fits zu Rhodium.

5 Diskussion

Die Halbwertszeit von $^{52}_{23}\text{V}$ hat einen Literaturwert von 224,6 s [3], wohingegen in Unterabschnitt 4.2 eine Halbwertszeit von (194 ± 11) s ermittelt wurde. Das entspricht einer Abweichung von 14 %, womit der Literaturwert als bestätigt angesehen werden kann, wenngleich er außerhalb des Konfidenzintervalls liegt.

Der Literaturwert für die Halbwertszeit von $^{104i}_{45}\text{Rh}$ beträgt 260 s [4]. Der hier ermittelte Wert ist hingegen $T_{1/2, \text{langsam}} = (212 \pm 26)$ s. Die prozentuale Abweichung beträgt also 14 %.

Die Halbwertszeit von $^{104}_{45}\text{Rh}$ wird in der Literatur mit 42,3 s angegeben [5]. Der im Versuch bestimmte Wert von $T_{1/2, \text{schnell}} = (36,5 \pm 1,4)$ s stimmt damit bei einer Abweichung von 14 % wieder ausreichend gut überein.

Literatur

- [1] *Versuchsanleitung zum Versuch 702: Aktivierung mit Neutronen*. TU Dortmund.
- [2] *Daten und Hinweise zum Versuch 702: Aktivierung mit Neutronen*. TU Dortmund.
- [3] ^{52}V (*Vanadium-52*). URL: <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=isotope&el=23&mz=52&show=nuklid&sel=zf> (besucht am 01.02.2020).
- [4] ^{104m}Rh (*Rhodium-104*). URL: <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=isotope&el=45&mz=104&nrg=0.129&show=nuklid> (besucht am 01.02.2020).
- [5] *Rhodium*. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Rhodium.html> (besucht am 01.02.2020).