

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Erzeugung von freien Neutronen	3
2.2	Untersuchung des radioaktiven Zerfalls	4
3	Durchführung und Aufbau	5
3.1	Aktivierung der Proben durch Beschuss mit α -Strahlung	5
3.2	Bestimmung der Halbwertszeit radioaktiver Präparate	5
4	Auswertung	7
4.1	Bestimmung der Halbwertszeit von Indium	7
4.2	Bestimmung der Halbwertszeiten der Zerfallsprodukte des Rhodium- Präparats	8
4.2.1	Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium-104i	10
4.2.2	Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium-104	12
4.2.3	Bestimmung der Summenkurve	13
5	Diskussion	14
	Literatur	15

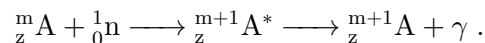
1 Zielsetzung

In dieser Messreihe wird sich mit dem radioaktiven Zerfall von aktivierten Atomkernen auseinander gesetzt. Das Ziel ist es die Halbwertszeit T zweier Isotope zu bestimmen.

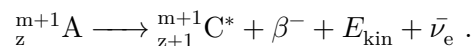
2 Theorie

Instabile Kerne werden erzeugt, wenn stabile Kerne mit Neutronen beschossen werden. Aufgrund der Ladungsneutralität von Neutronen wird weniger Energie benötigt, um diese zu aktivieren. Sie müssen nicht die Coulomb-Barriere des geladenen Kern überwinden.

Eine allgemeine Kernreaktion wird mit Hilfe eines Beispielkerns beschrieben



Hierbei stellt ${}_Z^m\text{A}^*$ den Zwischenkern oder auch Compoundkern dar. Die Energie dieses Zwischenkerns ist im Vergleich zu dem Ausgangskern um die kinetische Energie und die Bindungsenergie deutlich höher als die Energien des Neutrons. Bei geringen kinetischen Energien des Neutrons wird kein Nukleon abgegeben, da die eingebrachte Energie zu minimal ist. Die Abgabe eines γ -Quants erfolgt nach etwa 10^{-16} s, sodass der Kern wieder in seinen Grundzustand zurückfällt. Der Kern ist zwar immernoch instabil, jedoch ist eine längere Lebensdauer gegeben als bei dem Zwischenkern. Unter der Emission eines Elektrons kann die Zerfallsreihe nun bei einem stabilen Kern enden



Zerfälle sind nur dann erlaubt, wenn die Masse auf der linken Seite der Reaktion größer sind als die Gesamtmasse auf der rechten Seite der Reaktion. Den Massenunterschied kann man abgeben durch die Einstein'sche Energie-Masse Beziehung mit

$$\Delta E = \Delta mc^2 \tag{1}$$

2.1 Erzeugung von freien Neutronen

Auf Grund der Instabilität von Neutronen werden sie nicht als freie Teilchen in der Natur beobachtet. Dadurch müssen sie über Kernreaktionen erzeugt werden. Dies geschieht beim Beschuss von ${}_4^9\text{Be}$ mit α -Teilchen. Die α -Teilchen stammen aus dem Zerfall von ${}^{226}\text{Ra}$ -Kernen.

Beim Beschuss von Neutronen auf stabile Atomkerne ist die charakteristische Größe der Wirkungsquerschnitt. Um diesen zu bestimmen werden Neutronen auf eine Folie mit dem Flächeninhalt von einem cm^2 geschossen. Die Gesamtanzahl der Neutronen wird über n angegeben, u ist die Anzahl der eingefangenen Neutronen und d ist die Dicke der beschossenen Folie. Die Anzahl der Atome pro Quadratzentimeter in der Folie wird über K angegeben. So ergibt sich für den Wirkungsquerschnitt

$$\sigma = \frac{u}{nKd} , \tag{2}$$

wobei die Einheit $[\sigma]$ in $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ angegeben wird.

Unterschieden wird zwischen langsamen und schnellen Neutronen. Der Einfangquerschnitt wird kleiner wenn die Geschwindigkeit größer wird, da gilt

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

Folglich ist die Neutronengeschwindigkeit v antiproportional zu dem Einfangquerschnitt.

Als Kriterium zur Klassifizierung der langsamen und schnellen Neutronen dient die de-Broglie-Wellenlänge λ . Diese ist definiert als

$$\lambda = \frac{h}{m_n v} . \quad (4)$$

Hierbei ist h das Planck'sche Wirkungsquantum und m_n die Neutronenmasse. Ist λ im Vergleich zu dem Kernradius von circa 10^{-12} kleiner, so kann die Wechselwirkung auch durch geometrische Optik betrachtet werden.

Schnelle Neutronen können durch verschiedene Reaktionen erzeugt werden, wohingegen langsame Neutronen abgebremst werden müssen. Dies geschieht über elastische Stöße mit Kohlenwasserstoffatomen in einem Paraffinmantel. Dieser liegt um die Neutronenquelle an. Da der größte Energieübertrag zweier elastischer Stoßpartner bei gleicher Masse erfolgt, wird Paraffin genutzt. Die Wasserstoffatome in dem Paraffin besitzen näherungsweise die gleiche Masse wie Neutronen. Werden Neutronen auf eine Geschwindigkeit v von $2,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ abgebremst, so spricht man von thermischen Neutronen.

2.2 Untersuchung des radioaktiven Zerfalls

Das Exponentialgesetz beschreibt den radioaktiven Zerfall von instabilen Atomkernen.

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (5)$$

Hierbei wird die Anzahl der anfänglichen instabilen Kerne über N_0 angegeben und λ stellt die Zerfallskonstante dar. Diese wird benötigt um die Halbwertszeit T wie folgt zu bestimmen

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} . \quad (6)$$

In diesem Versuch wurde das Zeitintervall δt untersucht. Daraus ergibt sich eine andere Halbwertszeit und ändert die Formel (5) zu

$$N\delta t(t) = N_0 \exp^{-\lambda t} \cdot (1 - \exp^{-\lambda \delta t}) \quad (7)$$

Eine lineare Regression kann durch die Wertepaare $\{\ln N_{\delta t}(t_i), t_i\}$ ermittelt werden. Dadurch kann die Zerfallskonstante λ bestimmt werden.

3 Durchführung und Aufbau

Der in diesem Versuch verwendete Aufbau besteht aus einem Geiger-Müller-Zählrohr, auf das eine aktivierte Probe aufgesteckt werden kann. Das Zählrohr ist über eine Bleiabschirmung möglichst gut von der Umgebungsstrahlung, dem sogenannten Nulleffekt, abgeschirmt. Dennoch wird zu Beginn der Messreihe eine Nullmessung ohne Präparat über $t = 900\text{ s}$ durchgeführt. Die Impulszählung erfolgt dabei mithilfe eines umschaltbaren Zählwerks, das nach einem festgelegten Zeitintervall auf einen zweiten Impulszähler umschaltet und ein einfaches Ablesen der Zählrate sowie eine kontinuierliche Messung ermöglicht. Der verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

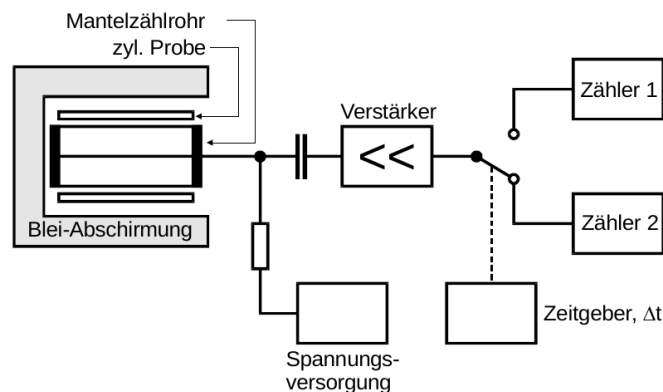


Abbildung 1: Schematische Darstellung des verwendeten Versuchsaufbaus mit Geiger-Müller-Zählrohr und umschaltbarem Zählwerk [1].

3.1 Aktivierung der Proben durch Beschuss mit α -Strahlung

Um radioaktive Präparate herzustellen, werden diese zunächst durch den Beschuss mit α -Teilchen aktiviert. Dazu werden sie in die Probebohrungen der in Abbildung 2 schematisch dargestellten Apparatur eingeführt. Bei der nun ablaufenden Kernreaktion entstehen dann zunächst instabile Kerne, die unter Emission von Neutronen in stabile Kerne zerfallen. Damit ist die Probe also aktiviert und kann für die weiteren Messungen verwendet werden.

3.2 Bestimmung der Halbwertszeit radioaktiver Präparate

Mit den zuvor aktivierten Proben kann nun über die in Abbildung 1 gezeigte Apparatur die Zählrate bestimmt werden. Dazu wird die Probe über das Geiger-Müller-Zählrohr gesteckt und in der Bleiabschirmung versenkt. Nach jedem zuvor festgelegten Messintervall wird dann eine Zählrate auf einem der beiden Anzeigen des Impulszählers abgelesen.

Zur Bestimmung der Halbwertszeit von Indium wird ein Messintervall von $\Delta t = 200\text{ s}$ eingestellt und eine Gesamtmessdauer von $t_{\text{ges}} = 4000\text{ s}$ verwendet.

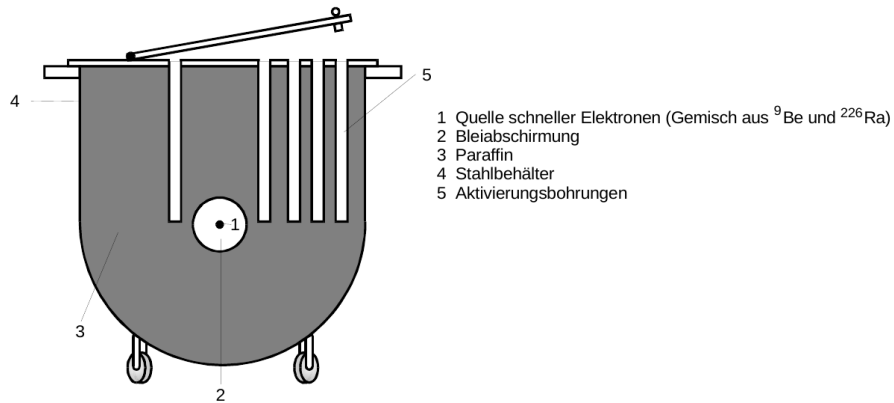


Abbildung 2: Schematische Darstellung der zur Aktivierung der Präparate verwendeten Apparatur [1].

Zur Bestimmung der Halbwertszeiten der Zerfallsprodukte des Rhodium-Präparats wird ein Messintervall von $\Delta t = 15\text{ s}$ eingestellt. Es wird über eine Gesamtzeit von $t_{\text{ges}} = 750\text{ s}$ gemessen.

4 Auswertung

Vor Beginn der ersten Messreihe wird eine Nullmessung durchgeführt, für die kein Präparat auf das Zählrohr gesteckt wird. Bei einer Messzeit von $\Delta t = 900$ s ergibt sich eine Zählrate von $N_{\text{Null}} = 287$ bzw. umgerechnet einer Zählrate von $N_{\text{Norm}} \approx 4,7833/\text{s}$.

4.1 Bestimmung der Halbwertszeit von Indium

Zur Bestimmung der Halbwertszeit von Indium wird die Zählrate in Abhängigkeit von der Zeit aufgenommen. Die vom Nulleffekt bereinigten Messwerte sind in Tabelle 1 dargestellt. Ihr Fehler ergibt sich aus dem \sqrt{N} -Gesetz. Außerdem werden mithilfe einer

Tabelle 1: Gesamtzählrate und Zählrate pro Sekunde in Abhängigkeit von der Zeit für Indium.

Zeit t/s	Zählrate N	mittl. Zählrate $N_{\Delta t}/\text{s}^{-1}$	Zeit t/s	Zählrate N	mittl. Zählrate $N_{\Delta t}/\text{s}^{-1}$
200	1994 ± 45	$9,97 \pm 3,16$	2200	1207 ± 35	$6,04 \pm 2,46$
400	1810 ± 43	$9,05 \pm 3,01$	2400	1127 ± 34	$5,64 \pm 2,37$
600	1673 ± 41	$8,37 \pm 2,89$	2600	1083 ± 33	$5,42 \pm 2,33$
800	1593 ± 40	$7,97 \pm 2,82$	2800	1018 ± 32	$5,09 \pm 2,26$
1000	1586 ± 40	$7,93 \pm 2,82$	3000	1003 ± 32	$5,02 \pm 2,24$
1200	1473 ± 38	$7,37 \pm 2,71$	3200	954 ± 31	$4,77 \pm 2,18$
1400	1444 ± 38	$7,22 \pm 2,69$	3400	886 ± 30	$4,43 \pm 2,11$
1600	1395 ± 37	$6,98 \pm 2,64$	3600	867 ± 29	$4,34 \pm 2,08$
1800	1324 ± 36	$6,62 \pm 2,57$	3800	915 ± 30	$4,58 \pm 2,14$
2000	1296 ± 36	$6,48 \pm 2,55$	4000	832 ± 29	$4,16 \pm 2,04$

Ausgleichsrechnung mit Python die Zerfallskonstante λ und die Anzahl der zum Zeitpunkt $t = 0$ vorhandenen stabilen Kerne N_0 bestimmt. Auf Grundlage der Gleichung (5) ergibt sich in halblogarithmischer Darstellung die Form

$$N(t) = -\lambda t + \ln N_0 \quad (8)$$

für die Ausgleichsfunktion. Für Indium ergeben sich die Werte

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Indium}} &= (2,218 \pm 0,062) \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} \\ \ln N_{0,\text{Indium}} &= 7,583 \pm 0,015 \\ \Rightarrow N_{0,\text{Indium}} &= 1964,51 \pm 29,47 \end{aligned}$$

Die graphische Darstellung der Messwerte und ihrer Fehler sowie die Ergebnisse der Ausgleichsrechnung sind in Abbildung 3 zu sehen. Für Indium ergibt sich damit aus Gleichung (6) eine Halbwertszeit von

$$T_{\text{Indium}} = (3125,10 \pm 87,67) \text{ s}.$$

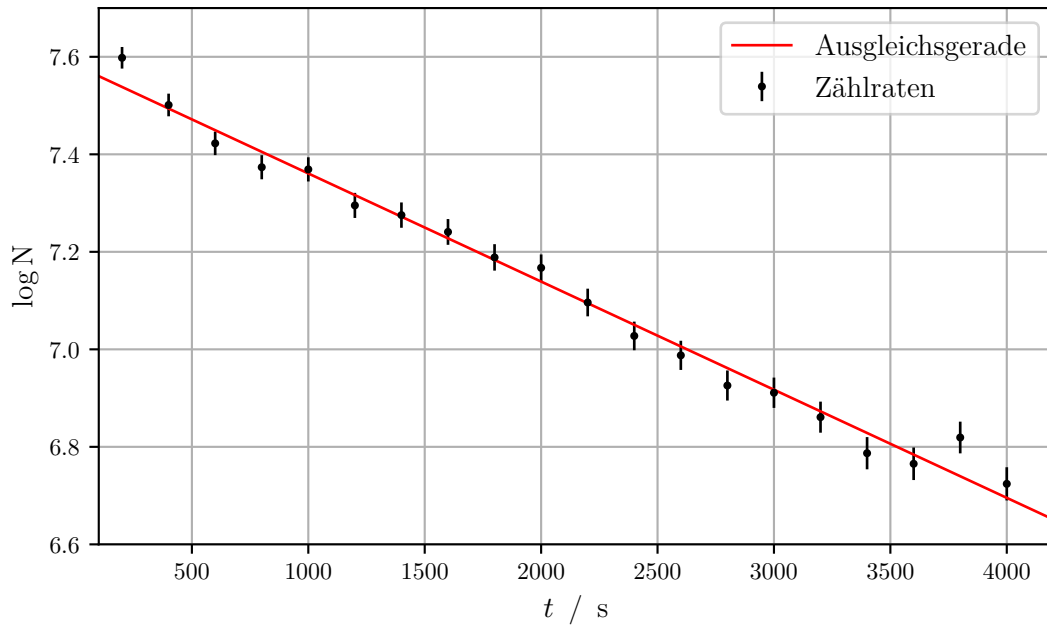


Abbildung 3: Graphische Darstellung der ermittelten Zählraten und ihrer Fehler für das Indium-Präparat sowie Ergebnisse der Ausgleichsrechnung.

4.2 Bestimmung der Halbwertszeiten der Zerfallsprodukte des Rhodium-Präparats

Bei der Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium ist zu berücksichtigen, dass es sich um einen kombinierten Zerfall der Rhodium-Isomere $^{104}\text{Rhodium}$ und $^{104i}\text{Rhodium}$ handelt. Daher ist es notwendig, die beiden Teilzerfälle voneinander zu differenzieren und die Halbwertszeiten separat zu bestimmen. Die dazu aufgenommenen Messdaten sind in Tabelle 2 zu sehen. Eine graphische Darstellung der vom Nulleffekt bereinigten Zählraten ist in Abbildung 4 zu sehen. Die Fehler folgen wiederum aus dem \sqrt{N} -Gesetz.

Tabelle 2: Gesamtzählrate und Zählrate pro Sekunde in Abhängigkeit von der Zeit für das Rhodium-Präparat.

Zeit t/s	Zählrate N	mittl. Zählrate $N_{\Delta t}/s^{-1}$	Zeit t/s	Zählrate N	mittl. Zählrate $N_{\Delta t}/s^{-1}$
15	507 ± 23	$33,81 \pm 5,82$	390	20 ± 4	$1,35 \pm 1,16$
30	417 ± 20	$27,81 \pm 5,27$	405	12 ± 3	$0,81 \pm 0,90$
45	322 ± 18	$21,48 \pm 4,63$	420	22 ± 5	$1,48 \pm 1,22$
60	284 ± 17	$18,95 \pm 4,35$	435	27 ± 5	$1,81 \pm 1,35$
75	227 ± 15	$15,15 \pm 3,89$	450	16 ± 4	$1,08 \pm 1,04$
90	176 ± 13	$11,75 \pm 3,43$	465	22 ± 5	$1,48 \pm 1,22$
105	138 ± 12	$9,21 \pm 3,04$	480	16 ± 4	$1,08 \pm 1,04$
120	113 ± 11	$7,55 \pm 2,75$	495	22 ± 5	$1,48 \pm 1,22$
135	116 ± 11	$7,75 \pm 2,78$	510	22 ± 5	$1,48 \pm 1,22$
150	89 ± 9	$5,95 \pm 2,44$	525	5 ± 2	$0,35 \pm 0,59$
165	81 ± 9	$5,41 \pm 2,33$	540	17 ± 4	$1,15 \pm 1,07$
180	74 ± 9	$4,95 \pm 2,22$	555	12 ± 3	$0,81 \pm 0,90$
195	57 ± 8	$3,81 \pm 1,95$	570	12 ± 3	$0,81 \pm 0,90$
210	63 ± 8	$4,21 \pm 2,05$	585	17 ± 4	$1,15 \pm 1,07$
225	44 ± 7	$2,95 \pm 1,72$	600	14 ± 4	$0,95 \pm 0,97$
240	54 ± 7	$3,61 \pm 1,90$	615	11 ± 3	$0,75 \pm 0,86$
255	39 ± 6	$2,61 \pm 1,62$	630	11 ± 3	$0,75 \pm 0,86$
270	37 ± 6	$2,48 \pm 1,58$	645	13 ± 4	$0,88 \pm 0,94$
285	37 ± 6	$2,48 \pm 1,58$	660	13 ± 4	$0,88 \pm 0,94$
300	31 ± 6	$2,08 \pm 1,44$	675	7 ± 3	$0,48 \pm 0,69$
315	43 ± 7	$2,88 \pm 1,70$	690	7 ± 3	$0,48 \pm 0,69$
330	31 ± 6	$2,08 \pm 1,44$	705	6 ± 2	$0,41 \pm 0,64$
345	32 ± 6	$2,15 \pm 1,47$	720	3 ± 2	$0,21 \pm 0,46$
360	24 ± 5	$1,61 \pm 1,27$	735	6 ± 2	$0,41 \pm 0,64$
375	34 ± 6	$2,28 \pm 1,51$	750	2 ± 1	$0,15 \pm 0,38$

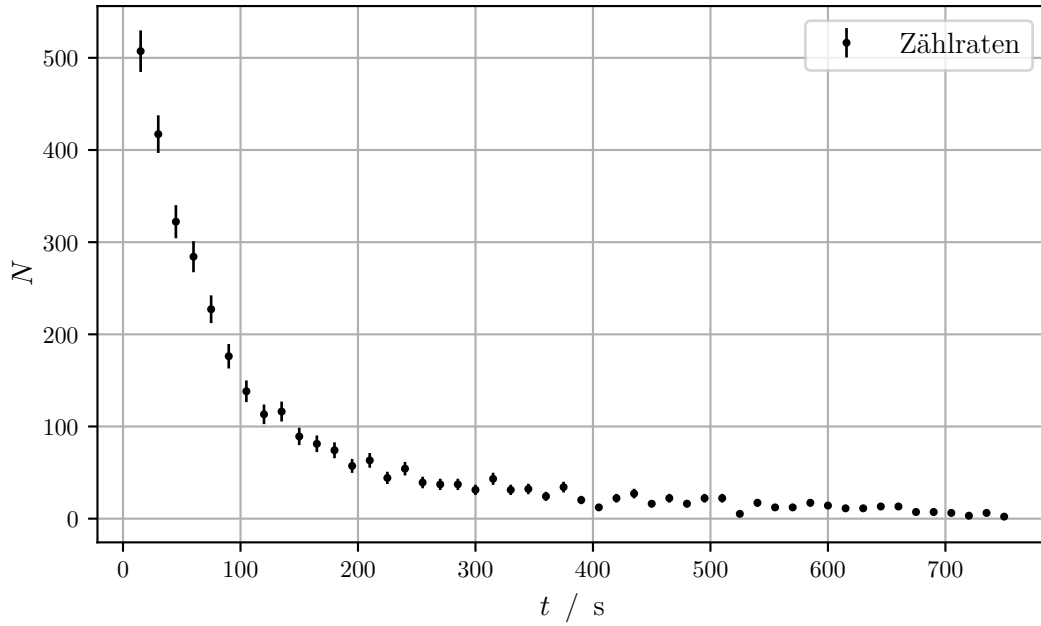


Abbildung 4: Graphische Darstellung der vom Nulleffekt bereinigten Zählraten und ihrer Fehler für das Rhodium-Präparat in linearer Skalierung.

4.2.1 Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium-104i

Zunächst wird mittels einer Ausgleichsrechnung mit Python gemäß Gleichung (8) die Zerfallskonstante des langlebigeren Rhodium-Isomers ermittelt. Dies geschieht unter der Annahme, dass ab einem Zeitpunkt t^* der Einfluss des kurzlebigen Isomers auf die Gesamtzählrate vernachlässigbar klein ist. Dieser Zeitpunkt wird in dieser Versuchsreihe bei $t^* = 405$ s festgesetzt. Bei der Ausgleichsrechnung ergeben sich die Parameter

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{Rh-104i}} &= (2,789 \pm 0,919) \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \\ \ln N_{0,\text{Rh-104i}} &= 4,164 \pm 0,509 \\ \Rightarrow N_{0,\text{Rh-104i}} &= 64,33 \pm 32,74.\end{aligned}$$

In Abbildung 5 sind die vom Nulleffekt bereinigten Zählraten und die Ergebnisse der Ausgleichsrechnung für den Teilzerfall von Rhodium-104i graphisch dargestellt. Die blau umkreisten Werte sind dabei diejenigen, die für die Ausgleichsrechnung berücksichtigt werden. Sie sind außerdem in Tabelle 3 zu finden. Aus den ermittelten Werten ergibt sich mit Gleichung (6) eine Halbwertszeit für $^{104i}\text{Rhodium}$ von

$$T_{\text{Rh-104i}} = (248,53 \pm 81,89) \text{ s}.$$

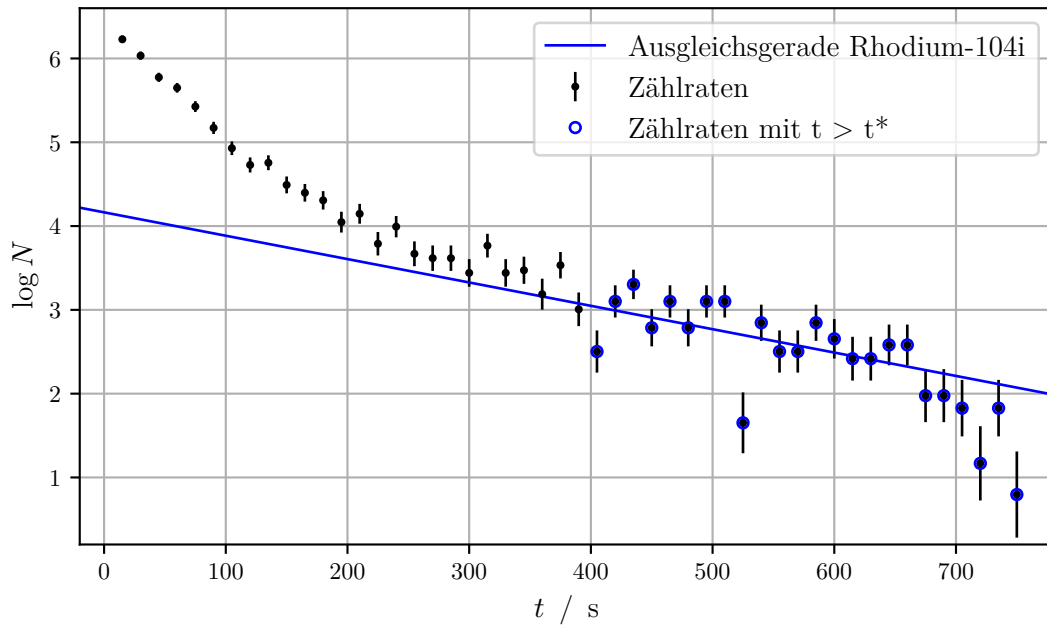


Abbildung 5: Graphische Darstellung der Zählraten und ihrer Fehler für das Rhodium-Präparat sowie die Ergebnisse der Ausgleichsrechnung für Rhodium-104i in halblogarithmischer Skalierung.

Tabelle 3: Für Ausgleichsrechnung für Rhodium-104i verwendete Zählraten und ihre Fehler.

Zeit t/s	Zählrate N	Zeit t/s	Zählrate N
405	12 ± 3	585	17 ± 4
420	22 ± 5	600	14 ± 4
435	27 ± 5	615	11 ± 3
450	16 ± 4	630	11 ± 3
465	22 ± 5	645	13 ± 4
480	16 ± 4	660	13 ± 4
495	22 ± 5	675	7 ± 3
510	22 ± 5	690	7 ± 3
525	5 ± 2	705	6 ± 2
540	17 ± 4	720	3 ± 2
555	12 ± 3	735	6 ± 2
570	12 ± 3	750	2 ± 1

4.2.2 Bestimmung der Halbwertszeit von Rhodium-104

Zur Bestimmung der Halbwertszeit des kurzlebigeren Rhodium-Isomers wird die per linearer Regression in Kapitel 4.2.1 angenommene Zählrate für das langlebigere Rhodium-Isomers von der Gesamtzählrate subtrahiert. Mithilfe dieser korrigierten Zählrate wird dann wieder eine lineare Ausgleichsrechnung mit Python durchgeführt. Die korrigierten Zählraten sowie die Ergebnisse der Ausgleichsrechnung sind in Abbildung 6 dargestellt. Die rot markierten Zählraten werden dabei nicht berücksichtigt, da sie augenscheinlich nicht mehr in den linearen Bereich fallen und vermutlich schon zu stark durch den Zerfall des langlebigeren Isomers beeinflusst sind. Die in die Ausgleichsrechnung einbezogenen Zählraten sind in Tabelle 4 dargestellt. Bei der Regression ergeben sich die Parameter

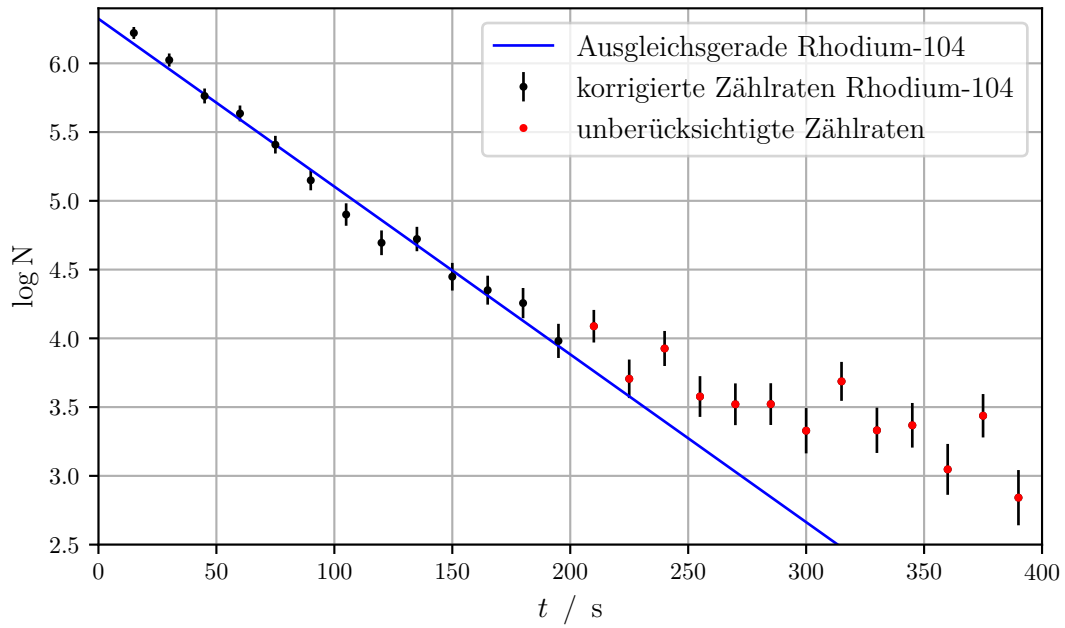


Abbildung 6: Graphische Darstellung der korrigierten Zählraten für das kurzlebigeren Rhodium-Isomer Rh-104 sowie Ergebnisse der Ausgleichsrechnung.

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{Rh-104}} &= (1,220 \pm 0,446) \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1} \\ \ln N_{0,\text{Rh-104}} &= 6,324 \pm 0,053 \\ \Rightarrow N_{0,\text{Rh-104}} &= 557,80 \pm 29,56.\end{aligned}$$

Damit ergibt sich für $^{104}\text{Rhodium}$ aus Gleichung (6) eine Halbwertszeit von

$$T_{\text{Rh-104}} = (56,81 \pm 20,77) \text{ s}.$$

Tabelle 4: Für Ausgleichsrechnung für Rhodium-104 verwendete Zählraten und ihre Fehler.

Zeit t/s	Zählrate N	Zeit t/s	Zählrate N
15	503 ± 22	120	109 ± 10
30	413 ± 20	135	112 ± 11
45	318 ± 18	150	85 ± 9
60	280 ± 17	165	78 ± 9
75	223 ± 15	180	71 ± 8
90	172 ± 13	195	54 ± 7
105	134 ± 12		

4.2.3 Bestimmung der Summenkurve

Aus den in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 berechneten Ausgleichskurven lässt sich mit der Gleichung

$$N_{\text{Summe}}(t) = N_{0,\text{Rh-104}} \cdot e^{-\lambda_{\text{Rh-104}} t} + N_{0,\text{Rh-104i}} \cdot e^{-\lambda_{\text{Rh-104i}} t}$$

eine Summenkurve berechnen. Diese sowie die ursprünglichen Messwerte sind in Abbildung 7 im Vergleich dargestellt.

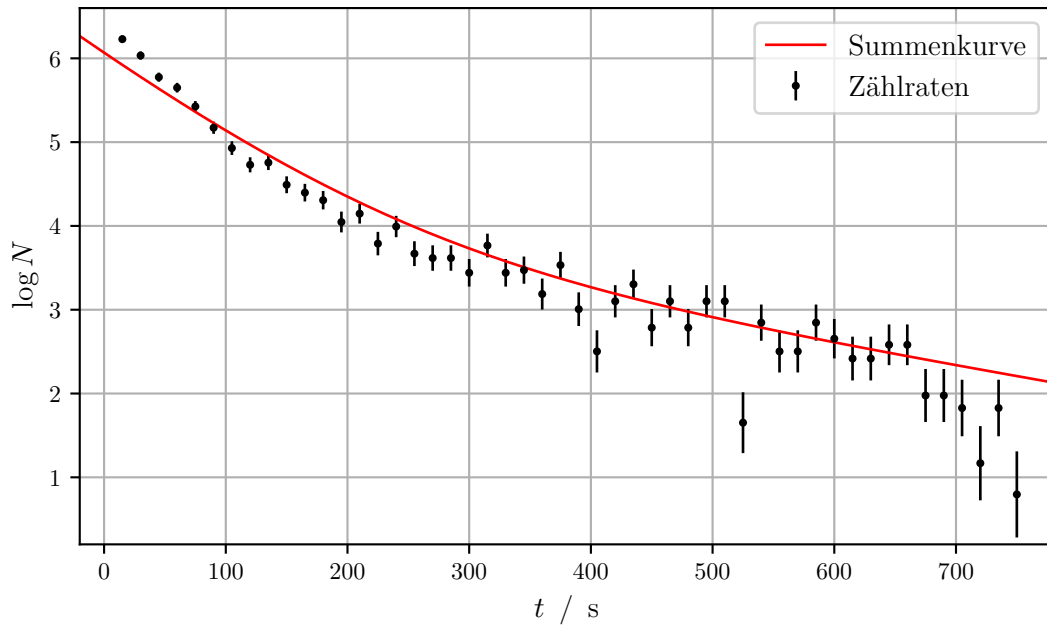


Abbildung 7: Graphische Darstellung der berechneten Summenkurve im Vergleich zu den aufgenommenen Zählraten.

5 Diskussion

Abweichungen vom Theoriewert werden wie folgt bestimmt

$$\Delta x = \frac{x_{\text{exp}} - x_{\text{theo}}}{x_{\text{theo}}} . \quad (9)$$

In der Tabelle 5 werden die ermittelten Halbwertszeiten für das Isotop und die Isomere dargestellt und mit den Theoriewerten verglichen.

Tabelle 5: Ermittelten Halbwertszeiten des Isotops und der Isomere und die Theorie-werte [2].

Isotop	Experimenteller Wert $T_{\text{exp}} / \text{s}$	Theoretischer Wert $T_{\text{theo}} / \text{s}$	Abweichung %
$^{116}\text{Indium}$	$(3125,10 \pm 87,67)$	3257,4	4,06
$^{104}\text{Rhodium}$	$(56,81 \pm 20,77)$	42,3	34,30
$^{104i}\text{Rhodium}$	$(248,53 \pm 81,89)$	260,4	4,56

Es fällt auf, dass die Abweichungen zu den Theoriewerten bei ^{116}In und ^{104i}Rh sehr gering sind, was auf eine erfolgreiche Messreihe deutet. Auf Grund dieser Werte lässt sich schließen, dass die Abweichungen auf statistische Fehler zurück zu führen sind.

Fehlerquellen stellen hierbei vor allem der Nulleffekt als auch das Geiger-Müller Zählrohr dar. Die von der Umgebung abgegebene Radioaktivität verläuft nicht konstant, und so kann anhand einer vorher ausgeführten Nullmessung nicht während des kompletten Experimentes eine vollständige Elimination stattfinden.

Zufällige Fehler sind hier sehr unwahrscheinlich, das Ablesen der Messwerte erwies sich als simpel. Auf Grund der digitalen Anzeige können so keine Ablesefehler entstehen.

Es lässt sich allerdings sagen, dass durch das Auswählen kurzer Zählraten die statistische Messungenauigkeit vergleichsweise sehr klein gehalten wird. Dies kann in den Tabellen 3 und 4 eingesehen werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Messreihe erfolgreich verlief. Die Aktivierung durch Neutronen wurde durch diese Versuchsreihe einleuchtend dargestellt.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zum Versuch V702*. 21. Mai 2019. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V702.pdf>.
- [2] Chemie Lexikon. *Liste der Isotope*. 21. Mai 2019. URL: https://www.chemie.de/lexikon/Liste_der_Isotope.html.