

# **V702 Aktivierung mit Neutronen**

Tobias Rücker

tobias.ruecker@tu-dortmund.de

Paul Störbrock

paul.stoerbrock@tu-dortmund.de

Durchführung: 26.05.2020, Abgabe: 02.06.20

# Inhaltsverzeichnis

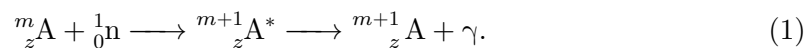
<b>1</b>	<b>Ziel</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>4</b>
4.1	Messung des Untergrunds . . . . .	5
4.2	Messung der Halbwertszeit einer Vanadium-Probe . . . . .	5
4.3	Messung der Halbwertszeit einer Rhodium-Probe . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>9</b>
	<b>Literatur</b>	<b>11</b>
	<b>Anhang</b>	<b>12</b>

# 1 Ziel

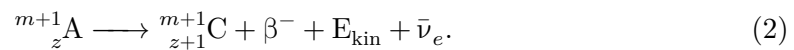
Die Kenntnis über die Stabilität von Atomen und den Verlaufsprozess von verschiedenen Zerfällen spielt nicht nur bei Messungen in der Physik, sondern vor allem auch in der Medizin, zum Beispiel in der Krebsbehandlung, eine Rolle. Daher wird im Folgenden die Halbwertszeit von zwei Materialien bestimmt, indem diese mit energiearmen Neutronen beschossen werden und die Teilchen mittels einem Geiger-Müller-Zählrohr gezählt werden.

## 2 Theorie

Die Stabilität von Atomen hängt stark von dem Verhältnis der Protonen und Neutronen ab. Sind Atome nicht stabil, zerfallen sie zu stabilen oder instabilen Kernen, wo bei instabilen der Zerfallsprozess noch nicht beendet ist. Eine wichtige Eigenschaft des Zerfallsprozesses stellt die Halbwertszeit  $T$  dar. Sie beschreibt die Zeit, nach der die Hälfte der Kerne einer Menge zerfallen sind. Für die Messung der Halbwertszeit in einer Größenordnung von Stunden und Sekunden werden stabile Kerne mit Neutronen beschossen. Diese Kerne werden nach der Absorption des Neutrons zu einem Zwischenkern  $A^*$ , welcher auch Compoundkern genannt wird. Die Energie des Neutrons verteilt sich auf die anderen Nukleonen, wodurch diese in höhere Energiezustände gebracht werden. Bei Neutronen mit geringen Energien kann kein Nukleon abgestoßen werden, weshalb es unter Aussendung eines Gammaquants in den Grundzustand übergeht [1]



Dabei gibt  $m$  die Massenzahl,  $z$  die Ordnungszahl,  $n$  das eingesendete Neutron,  $A$  den beschossenen Kern,  $A^*$  den Zwischenkern und  $\gamma$  den ausgesendeten Gammaquant an. Durch das zusätzliche Neutron ist der Kern nun instabil und zerfällt [1]



Hierbei ist  $C$  der aus dem Zerfall entstehende Kern,  $\beta^-$  ein Elektron und  $\bar{\nu}_e$  ein Elektron-Antineutrino. Die Masse der Teilchen auf der linken Seite der Reaktionsgleichung ist größer als die der Teilchen auf der rechten Seite. Diese Energie geht in Form von kinetischer Energie an das Elektron und Elektron-Antineutrino. Um möglichst viele Zerfälle für eine Messung zu erzeugen wird ein entsprechend hoher Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  benötigt. Der Wirkungsquerschnitt beschreibt die Fläche, die der Atomkern haben müsste, damit jedes Neutron mit der Fläche wechselwirkt. Für eine geringe Energie der Neutronen gegenüber des Zwischenkerns ergibt sich folgende Proportionalität für den Wirkungsquerschnitt [1]

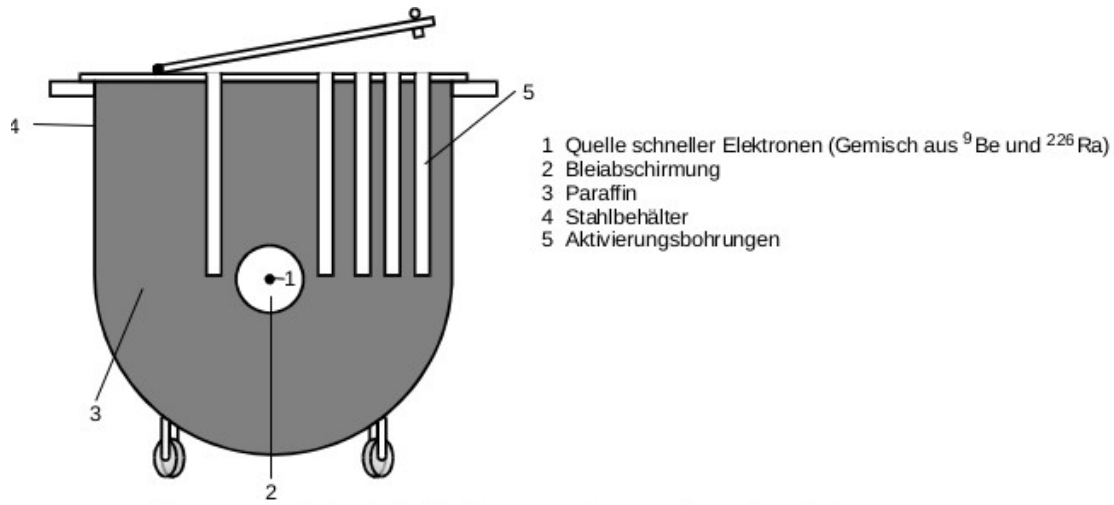
$$\sigma \sim \frac{1}{v}, \quad (3)$$

wobei  $v$  die Geschwindigkeit der Neutronen ist. Aufgrund der Proportionalität sind niederenergetische Neutronen für die Messung notwendig, was verständlich ist, da eine kleinere Energie eine geringere Geschwindigkeit bedeutet und sich das Neutron dadurch länger in der Einwirkungssphäre befindet.

Für die Erzeugung von Neutronen kann die Reaktion von Beryllium mit Alpha-Teilchen genutzt werden [1]



Die  $\alpha$ -Teilchen entstehen dabei aus dem Zerfall von  ${}^{226}\text{Ra}$ -Kerne. Da die Neutronen nach der Reaktion noch zu energiereich sind, wird eine dicke Materieschicht eingebracht, durch die die Neutronen hindurchdiffundieren müssen. Die Kerne davon sollten auf einer gleichen Größenordnung wie die Neutronen sein, damit der Energieübertrag am größten ist. Daher eignet sich Paraffin dafür. Ein schematischer Aufbau für so eine Quelle ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



**Abbildung 1:** Schematischer Aufbau einer Neutronenquelle [1]. Durch den Zerfall von Radium-Kernen entstehen  $\alpha$ -Teilchen, welche mit den Beryllium-Atomen wechselwirken. Dadurch entstehen Neutronen, welche im Paraffin einen Teil ihrer Energie abgeben und damit abgebremst werden.

Die abgebremsten Neutronen haben eine kinetische Energie, welche der mittleren Energie der Umgebung entspricht und werden thermische Neutronen genannt.

Für Messungen wird eine zylindrische Probe in einen Aktivierungsschacht gebracht. Da es schwer ist die Zerfallsrate pro Zeit genau zu bestimmen, wird die Anzahl der Zerfälle über ein Zeitintervall  $\Delta t$  betrachtet. Dafür ergibt sich ein einfacher exponentieller Zusammenhang [1]

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

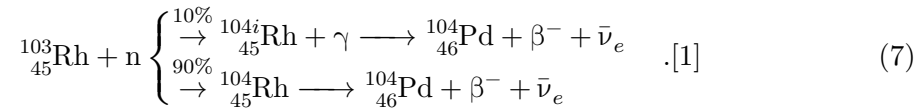
Dabei stellt  $N_0$  die zu Messbeginn vorhandene Anzahl an instabilen Kernen und  $\lambda$  die Zerfallskonstante dar. Die Halbwertszeit lässt sich über die Formel [1]

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

berechnen.

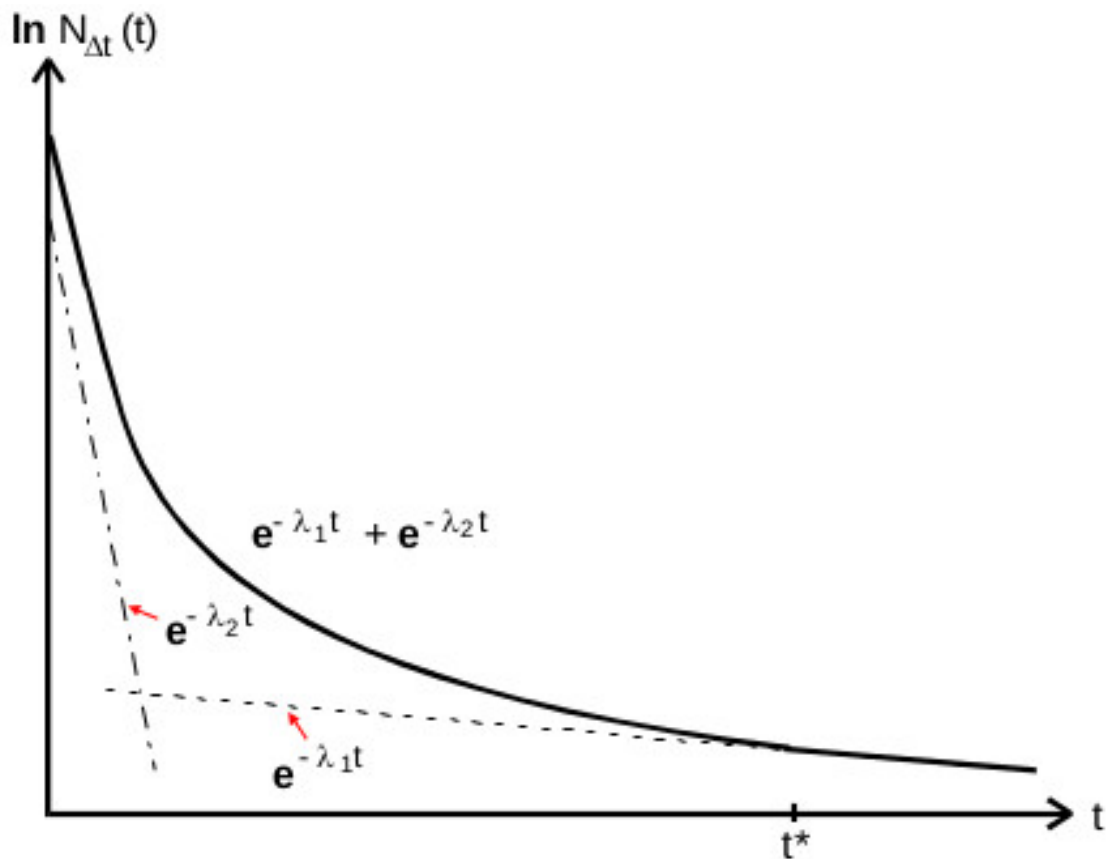
Eine geeignete Wahl des Zeitintervalls ist wichtig, da es ansonsten zu hohen statistischen oder systematischen Fehlern kommt.

Manche Materialien wie Rhodium haben zwei Zerfallsketten



Das i beim Rhodium steht für einen isomeren Kern, welcher sich nur in der Energie und Halbwertszeit vom Rhodium-Kern unterscheidet.

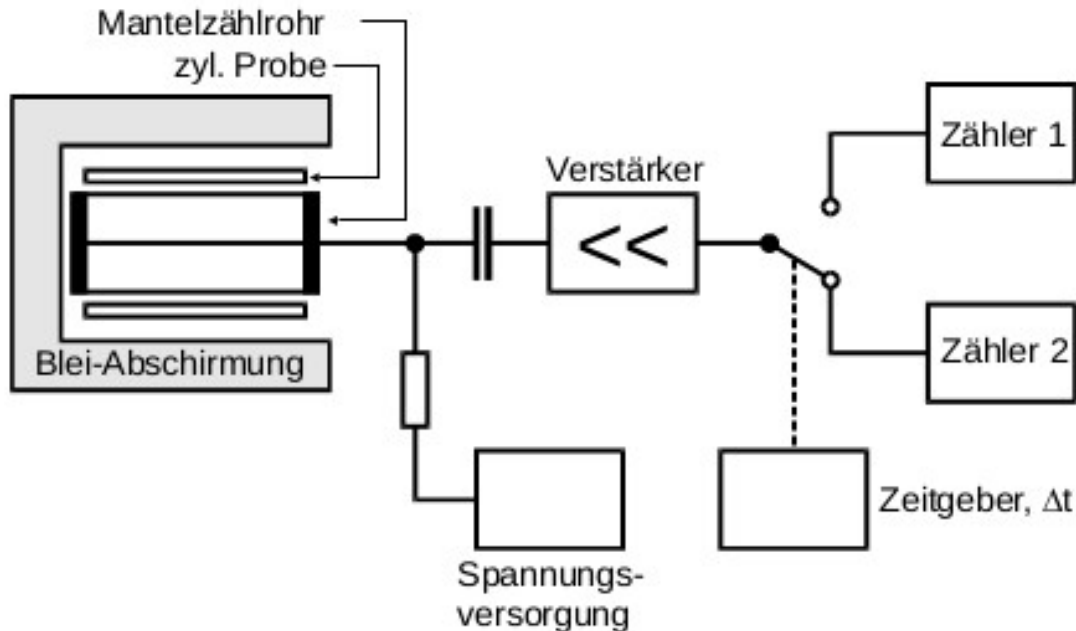
Da der nicht-isomere Kern kurzlebiger ist, wird ab einem gewissen Zeitpunkt  $t^*$  hauptsächlich der isomere Kern gemessen, was in der folgenden Abbildung zu erkennen ist:



**Abbildung 2:** Logarithmische Darstellung eines zeitlichen Zerfalls mit 2 Zerfallsketten [1]. Die gestrichelten Linien zeigen den potentiellen Verlauf der Geraden für die einzelnen Komponenten der Zerfallsreaktion. Der Zeitpunkt  $t^*$  markiert den Übergang, ab dem der kurzlebige Kern kaum noch einen Einfluss hat und eine Gerade entsteht.

### 3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Um die Halbwertszeit der gewählten Materialien bestimmen zu können, wird der folgende Aufbau verwendet.



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau der Messapparatur [1]. Innerhalb der Bleiabschirmung befindet sich die zylindrische Probe, welche untersucht werden soll. Die elektrischen Signale, welche durch die Zerfälle entstehen werden an einen Verstärker weitergeleitet und anschließend vom Zählrohr gemessen. Dabei wird nach dem Zeitintervall  $\Delta t$  periodisch auf den jeweils anderen Zähler umgeschaltet.

Zuerst wird die Untergrundrate  $U_N$  bestimmt, dafür wird keine Probe auf das Geiger-Müller-Zählrohr gesteckt. Um den Fehler möglichst gering zu halten, wird eine minimale Messzeit von 500 bis 600 s gewählt. Das Zeitintervall wird dabei an dem Codierschalter an der Frontplatte eingestellt.

Für die Messung der Proben werden diese auf das Geiger-Müller-Zählrohr gesteckt und ein, für die Messung geeignetes, Zeitintervall eingestellt. Dieses kann von Probe zu Probe variieren und muss eventuell durch Vormessungen bestimmt werden.

### 4 Auswertung

Für die Erstellung der Graphen wird matplotlib [3] verwendet. Alle in der Auswertung befindlichen Messungenauigkeiten, welche sich durch die gauß'sche Fehlerfortpflanzung

ergeben, werden wiederum mit Uncertainties [5] berechnet.

#### 4.1 Messung des Untergrunds

Für die Bestimmung des Untergrunds wird ein Zeitintervall von  $\Delta t = 300$  s gewählt. Die gemessenen Werte lauten

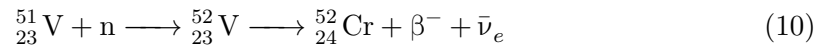
$$N_U = \{129, 143, 144, 136, 139, 126, 158\} \text{Imp}/200\text{s}. \quad (8)$$

Der Mittelwert des Untergrundes ist dabei

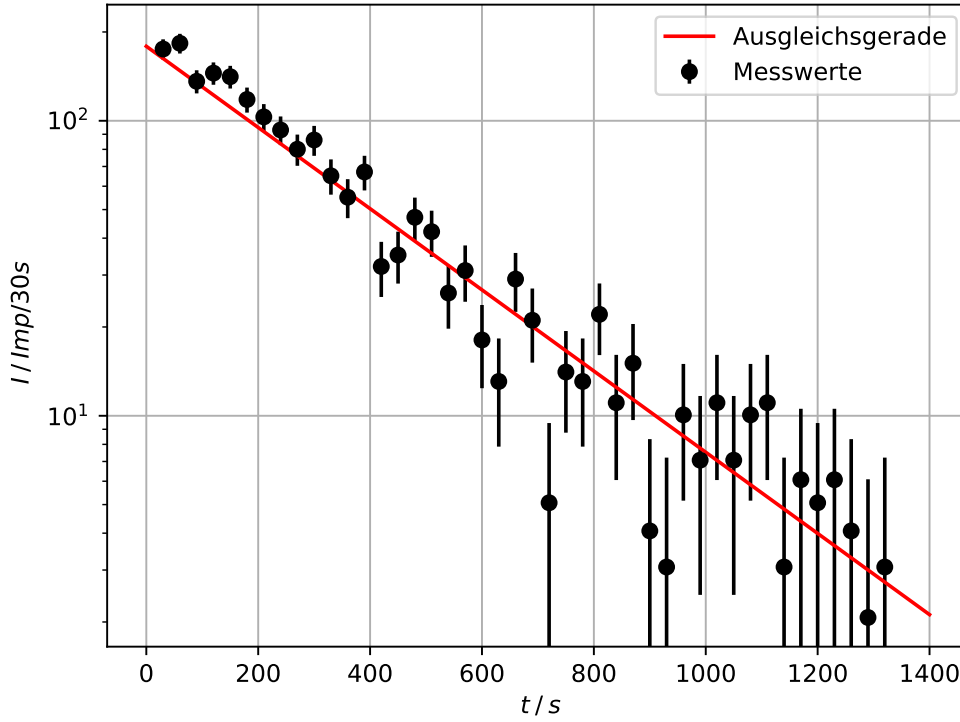
$$\bar{N}_U = (139 \pm 4) \text{Imp}/200\text{s}. \quad (9)$$

#### 4.2 Messung der Halbwertszeit einer Vanadium-Probe

Der Zerfall von Vanadium lässt sich in diesem Fall der Reaktionsgleichung (2) zuordnen. Seine Reaktionsgleichung sieht im genauen wie folgt aus:



Die Tabelle mit den Messwerten für die Vanadium-Probe befindet sich im Anhang 2. Bei der Erstellung des Plots sind von den Messwerten ein zehntel der Untergrund-Zählrate abgezogen worden. Der Plot sieht dann folgendermaßen aus:



**Abbildung 4:** Zählraten einer zylindrischen Vanadiumprobe in Abhängigkeit der Zeit  $t$  [3]. Dabei ist die Zählrate logarithmisch aufgetragen und der Untergrund von den Gesamtzählraten abgezogen worden. Die Fehler kommen dabei aus der Poissonverteilung  $\Delta n = \sqrt{n}$ .

Die Ausgleichsgerade in der Abbildung wird mit der Funktion Polyfit aus Scipy [4] und den Messwerten aus der Tabelle 2 erstellt. Die Parameter der Ausgleichsgeraden

$$\ln(N_{\Delta t}(t)) = a \cdot t + b \quad (11)$$

lauten

$$a = (-3,17 \pm 0,16) \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (12)$$

$$b = 5,19 \pm 0,13, \quad (13)$$

wobei sich die Parameter  $a$  und  $b$  durch Vergleich mit Gleichung (5) als

$$a = -\lambda \quad (14)$$

$$b = \ln(N_0(1 - e^{\lambda \Delta t})) \quad (15)$$

identifizieren lassen.

Aus der Steigung  $a$  lässt sich nun die Zerfallskonstante  $\lambda$

$$\lambda = (3,17 \pm 0,16) \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (16)$$



und mithilfe von Gleichung (6) die Halbwertszeit  $T$

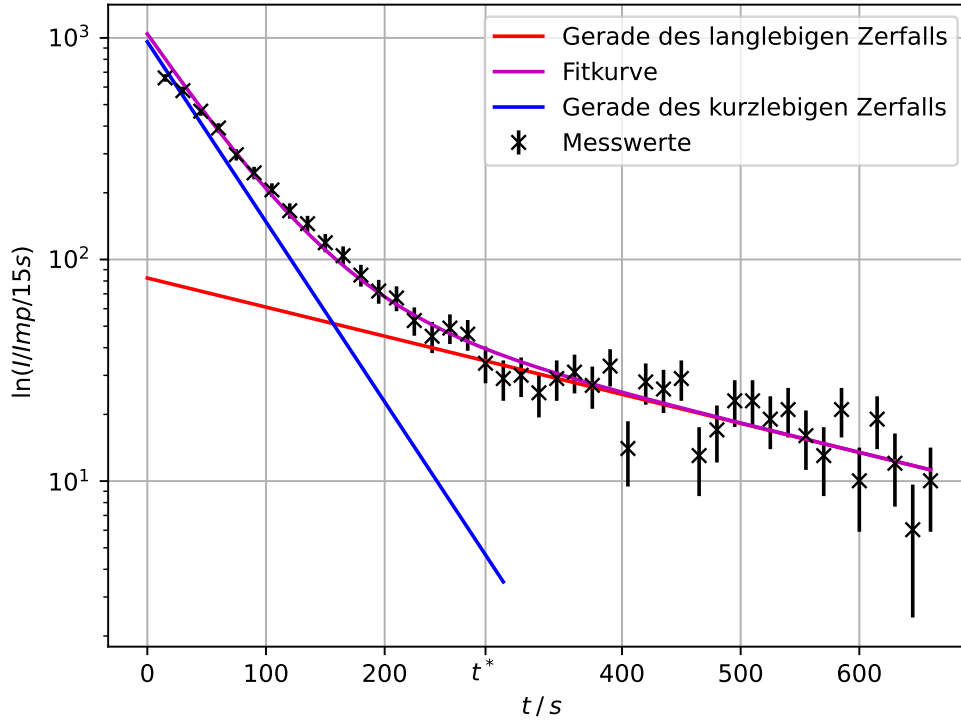
$$T_V = (219 \pm 11) \text{ s} \quad (17)$$

bestimmen. Die Fehler aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung werden dabei mit der folgenden Formel bestimmt

$$\Delta T = \sigma_\lambda \frac{\ln(2)}{\lambda^2}. \quad (18)$$

### 4.3 Messung der Halbwertszeit einer Rhodium-Probe

Die Messwerte aus der Messung der Zerfallsrate findet sich im Anhang 3. Als Zeintintervall ist für Rhodium  $\Delta t = 15 \text{ s}$  gewählt worden. Auch hier ist der Untergrund bei der Erstellung des Plots abgezogen worden, indem dieser durch 20 geteilt wurde, um ebenfalls ein Zeitintervall von 15 s für den Untergrund zu haben. Der Plot selbst sieht dann wie folgt aus:



**Abbildung 5:** Messung der Zerfallsrate von Rhodium mit einem Zeitintervall von  $\Delta t = 15\text{ s}$  [3]. Die Zählzeit ist hier logarithmisch aufgetragen. Die Fitkurve entsteht aus der Überlagerung der zwei Zerfallsreihen von Rhodium analog zu Abbildung 2, wobei die einzelnen Geraden eben diese darstellen. Die rote Gerade bildet den langlebigen Zerfall von dem isomeren Kern  $^{104i}_{45}\text{Rh}$  ab, während die Blaue den kurzlebigen Zerfall von  $^{104}_{45}\text{Rh}$  darstellt. Die beiden Geraden werden durch die Funktion  $\ln(N_{\Delta t}(t)) = a \cdot t + b$  dargestellt. Bei der Erstellung der Geraden für die kurze Laufzeit werden die Messwerte vom Gesamtspektrum bis zum Punkt  $t^*$  von den entsprechenden Werten der roten Geraden abgezogen. Der Wert  $t^* = 285\text{ s}$  stellt dabei den Punkt dar, ab dem hauptsächlich noch der langlebige Zerfall vorzufinden ist. Die Fitkurve entsteht durch die Addition der beiden Geraden.

Für die Gerade des langlebigen Zerfalls wird die Funktion polyfit aus Scipy [4] verwendet. Als Werte sind alle Messwerte ab  $t^* = 285\text{ s}$  benutzt worden. Die Gerade hat hier die gleiche Form wie in Gleichung (11) und die Fitparameter lauten

$$a_l = (-3,02 \pm 0,49) \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (19a)$$

$$b_l = 4,41 \pm 0,24 . \quad (19b)$$

Die Relationen für die Fitparameter a und b sind immer noch gegeben durch Gleichung (14) und (15). Daraus ergibt sich für die Zerfallskonstante der Wert

$$\lambda_l = (3,02 \pm 0,49) \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (20)$$

und für die Halbwertszeit ergibt sich nach Gleichung (6)

$$T_{Rh,l} = (230 \pm 37) \text{ s} . \quad (21)$$

Die Messungenauigkeiten werden wie bei Vanandium mit Formel (18) bestimmt. Für den kurzlebigen Verlauf ist von den Messwerten für N aus Tabelle 3, welche kleiner als  $t^*$  sind, von den entsprechenden Werten der langlebigen Gerade abgezogen und damit eine Ausgleichsgerade mit der Funktion polyfit aus Scipy [4] erstellt. Die Relationen sind äquivalent zu dem langlebigen Zerfall, wodurch sich für die Fitparameter folgende Werte ergeben

$$a_k = (-1,871 \pm 0,082) \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (22a)$$

$$b_k = 6,87 \pm 0,13 . \quad (22b)$$

Die Zerfallskonstante und die Halbwertszeit betragen dann

$$\lambda_k = (1,871 \pm 0,082) \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1} , \quad (23)$$

$$T_{Rh,k} = (37,1 \pm 1,6) \text{ s} . \quad (24)$$

Die Fitkurve entsteht dann durch die Addition der beiden einzelnen Geraden.

## 5 Diskussion

**Tabelle 1:** In dieser Tabelle sind alle für die Diskussion relevanten Werte aufgelistet. Dabei werden die Messwerte, die dazugehörigen Literaturwerte, sowie deren relativer Fehler in einer Zeile dargestellt. Die Quellverweise der Literaturwerte sind direkt neben diesen vorhanden.

	Messwert	Literaturwert	relativer Fehler $\frac{mess-lit}{lit}$
$T_V$	$(219 \pm 11) \text{ s}$	225,6 s [6]	3,03 %
$T_{Rh,l}$	$(230 \pm 37) \text{ s}$	258 s [2]	11,04 %
$T_{Rh,k}$	$(37,1 \pm 1,6) \text{ s}$	42 s [2]	11,77 %

Die Zerfallszeit von Vanadium aus Tabelle 1 zeigt einen guten Wert, da sich der Literaturwert innerhalb der Messungenauigkeit befindet. Der relative Fehler ist demensprechend in einem angemessenen Bereich. Die vorhandene Abweichung könnte mit der großen Verteilung um den Mittelwert der letzten Messwerte in Abbildung 4 zusammenhängen. Dieser könnte mit durch die zufallsbasierte Messung zustande kommen, oder aber mit der

Untergrundmessung zusammenhängen. Die Untergrundmessung ist in einem wesentlich größeren Messzeitintervall als bei der Messung von Vanadium gewählt worden, wodurch diese nicht zwangsweise für jeden Wert den tatsächlichen Untergrund darstellt, sondern einen Durchschnittswert für 300 s.

Die Zerfallszeiten von Rhodium und seinen isomeren Kern haben einen größeren relativen Fehler als bei Vanadium. Beim isomeren Kern, also dem langlebigen Zerfall, ist der Literaturwert trotzdem innerhalb der Messungenauigkeit. Die relativen Fehler können dabei wiederum durch die gleiche Begründung wie bei Vanadium erklärt werden.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. Versuchsanleitung zu Versuch Nr.702 Aktivierung mit Neutronen. 2020.
- [2] Arnold Flammersfeld. „Isomere zu stabilen Kernen bei Rhodium und Silber“. In: Zeitschrift für Naturforschung A 1.1 (1946), S. 3–10.
- [3] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [4] 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/>.
- [5] Eric O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] Andras Szabo, Else Damsgaard und Kaj Heydorn. „Determination of vanadium in soil and plant samples by INAA“. In: Izotoptechnika 29.4 (1986), S. 279–282.

## Anhang

**Tabelle 2:** Messwerte aus der Messung der Zerfälle von Vanadium. Bei den Messungen wurden die Zerfälle in einem Zeitintervall  $\Delta t = 30$  s gemessen. Die Fehler für die Zerfälle kommen von der Poissonverteilung und betragen  $\Delta N = \sqrt{N}$ .

$t / s$	$N / Imp/30s$	$t / s$	$N / Imp/30s$
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 3:** Messwerte aus der Messung der Zerfälle von Rhodium. Bei den Messungen wurden die Zerfälle in einem Zeitintervall  $\Delta t = 15\text{ s}$  gemessen. Die Fehler für die Zerfälle kommen von der Poissonverteilung und betragen  $\Delta N = \sqrt{N}$ .

$t / s$	$N / Imp/15s$	$t / s$	$N / Imp/15s$
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	$17 \pm 4,1$