

V702

Aktivierung mit Neutronen

Mirjam Prayer

mirjam.prayer@tu-dortmund.de

Nikola Mang

nikola.mang@tu-dortmund.de

Durchführung: /

Abgabe: 31.01.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Kernreaktionen mit Neutronen	3
1.2	Zerfall instabiler Isotope	3
1.3	Besonderheiten des Isotopes Rhodium	4
2	Durchführung	5
2.1	Erzeugung niederenergetischer Neutronen	5
2.2	Untersuchung des Zerfalls	6
3	Auswertung	7
3.1	Vanadium	7
3.2	Rhodium	12
4	Diskussion	15
4.1	Vanadium	16
4.2	Rhodium	16

1 Theorie

Ziel dieses Versuches ist es, die Halbwertszeit und Zerfallskurve mehrerer Isotope zu bestimmen. Zu diesem Zweck werden Materialien mit Neutronen beschossen, um instabile Kerne zu erzeugen. Im Folgenden wird zunächst auf die Wechselwirkung von Neutronen mit Atomkernen und dann den Zerfall von instabiler Isotope eingegangen.

1.1 Kernreaktionen mit Neutronen

Die Wahrscheinlichkeit für die Reaktion eines Atomkerns eines Materials mit einem Neutron wird durch den Wirkungsquerschnitt beschrieben. Dieser ist stark geschwindigkeitsabhängig. Für große Geschwindigkeiten kann die Wechselwirkung auf geometrische Überlegungen zurückgeführt werden. Aufgrund von Interferenzen sind für kleine Geschwindigkeiten geometrische Überlegungen nicht zielführend. Hier kann die Formel

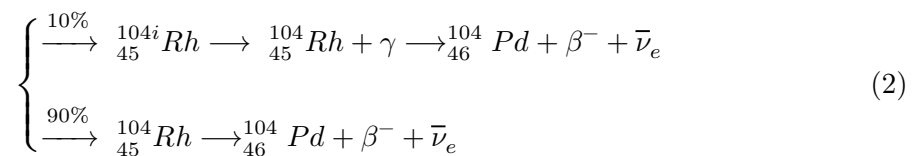
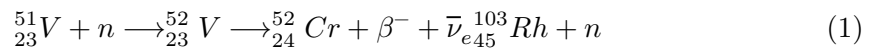
$$\sigma(E) = \sigma_0 \sqrt{\frac{E_{r_i}}{E}} \frac{\tilde{c}}{(E - E_{r_i})^2 + \tilde{c}}$$

verwendet werden, wobei \tilde{c} und σ_0 charakteristische Konstanten der Kernreaktion sind und E_{r_i} die Energieniveaus des entstehenden Zwischenkerns. Bei $E \ll E_r$ kann $(E - E_r)^2$ als konstant angenommen werden, woraus folgt, dass sich der Wirkungsquerschnitt antiproportional zur Neutronengeschwindigkeit verhält. Da durch Neutronen niedriger Geschwindigkeiten offenbar mehr Kernreaktionen erzeugt werden, bietet es sich an, diese für das Erzeugen von instabilen Kernen zu verwenden.

Dringt ein Neutron in einen Atomkern ein, entsteht zunächst ein Zwischenkern. Dieser besitzt eine um die kinetische Energie und Bindungsenergie des Neutrons erhöhte Energie gegenüber dem ursprünglichen Kern. Diese verteilt sich auf die Nukleonen, weshalb der Kern nur selten Neutronen und Nukleonen abstößt. Insbesondere bei niedrigen kinetischen Energien des Neutrons ist dies besonders unwahrscheinlich. Der angeregte Kern geht dann unter Emission eines γ -Quants in seinen Grundzustand über. Dieser ist aber aufgrund der erhöhten Neutronzahl kein stabiler Kern mehr. Daher emittiert er ein Elektron und ein Antineutrino, um sich wieder in einen stabilen Kern zu verwandeln.

1.2 Zerfall instabiler Isotope

Im folgenden werden die Elemente Vanadium und Rhodium untersucht. Proben dieser Elemente werden in die Nähe einer Neutronenquelle gebracht, wodurch sie angeregt werden. Die angeregten Atomkerne verhalten sich gemäß folgendermaßen:



Der radioaktive Zerfall lässt sich durch Gleichung ?? beschreiben,

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

wobei $N(t)$ die Anzahl der zur Zeit t noch nicht zerfallenen Kerne angibt. λ ist die sogenannte Zerfallskonstante. Die Halbwertszeit lässt sich dann offensichtlich durch

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \Leftrightarrow T = \ln \frac{2}{\lambda} \quad (3)$$

berechnen. Es gestaltet sich jedoch schwierig $N(t)$ zuverlässig zu bestimmen. Anhand der Beta-Zerfälle lassen sich allerdings die in einem Zeitintervall Δt zerfallenen Kerne $N_{\Delta t}(t)$ durch einen Strahlendetektor messen. Für $N_{\Delta t}(t)$ gilt:

$$N_{\Delta t}(t) = N(t) - N(t + \Delta t) = N_0 e^{-\lambda t} - N_0 e^{-\lambda(t+\Delta t)} = N_0(1 - e^{-\lambda \Delta t})e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Sodass nach Anwenden des natürlichen Logarithmus ein linearer Zusammenhang folgt.

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

1.3 Besonderheiten des Isotopes Rhodium

Wie in Gleichung 2 zu erkennen, geht Rhodium bei Anregung mit einer 90 % -tigen Wahrscheinlichkeit in das instabile Isotop ^{104}Rh und mit 10 % -tiger Wahrscheinlichkeit in das instabile Isotop ^{104i}Rh über. Die Zerfälle besitzen allerdings unterschiedliche Halbwertszeiten und das Isotop ^{104i}Rh zerfällt unter Aussendung von γ -Strahlung weiter in das Isotop ^{104}Rh . Der Zerfall dieser Atomkerne kann aber vernachlässigt werden. Wie in Grafik ?? dargestellt wird zunächst der Zerfallsprozess mit der geringeren Halbwertszeit überwiegen und zur späteren Zeit der Zerfallsprozess mit der höheren Halbwertszeit.

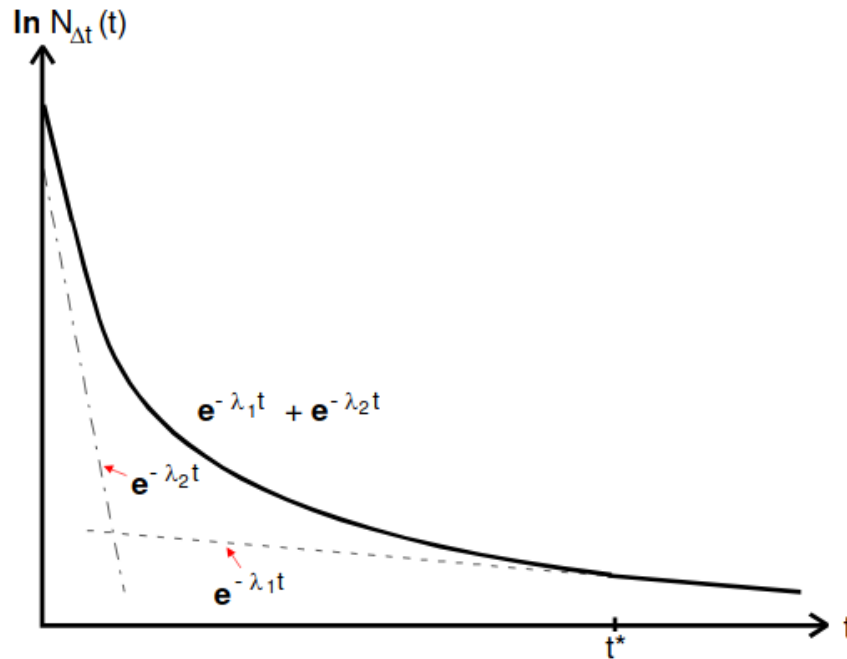


Abb. 2: Zerfallskurve eines Präparates , das aus 2 Isotopen mit sehr unterschiedlichen Zerfallskonstanten ($\lambda_2 \ll \lambda_1$) besteht.

λ_l kann also aus den Werten $t > t^+$ mittels Ausgleichsrechnung berechnet werden. Nun wird dieser Wert in Gleichung 4 eingesetzt und daraus die Werte $N_{\Delta t_l}$ gewonnen. Subtrahiert von den Gesamtzählraten $N_{\Delta t}(t_i)$ liefern sie die Werte für den langsameren Zerfall. Auch hier wird eine Ausgleichsrechnung mit kleinen t (aufgrund von statistischen Schwankungen) zur Bestimmung durchgeführt.

2 Durchführung

2.1 Erzeugung niederenergetischer Neutronen

Zunächst werden Neutronen durch den Beschuss von ^9Be -Kernen mit α -Teilchen erzeugt. Da wie in Kapitel langsame Neutronen einen besonders hohen Wirkungsquerschnitt aufweisen, werden sie in Paraffin abgebremst. Die verwendete Apparatur ist in Grafik 1 gezeigt.

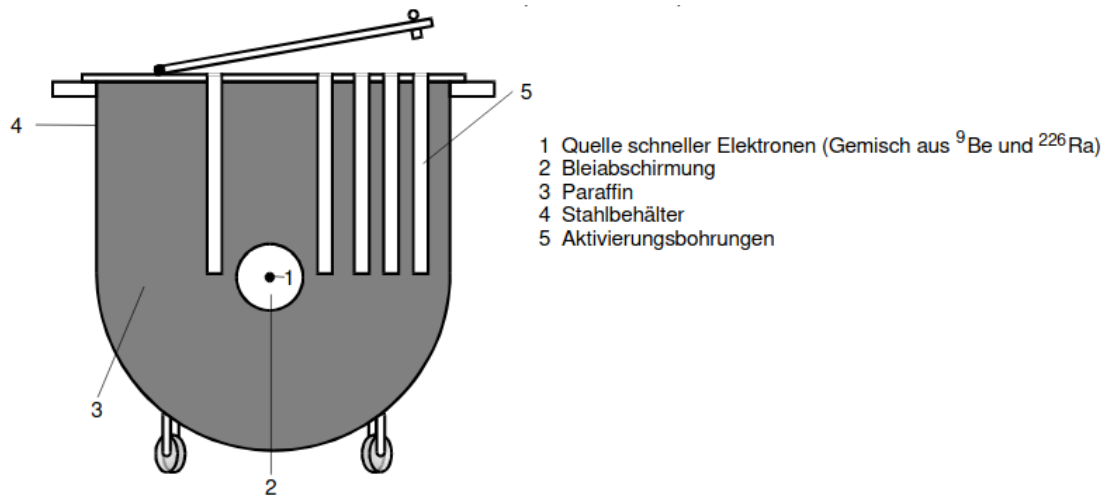


Abbildung 1: Aufbau zur Aktivierung der Proben.

Die zylinderförmigen Proben werden also in die Aktivierungsbohrungen eingeführt, um die Materialien anzuregen.

2.2 Untersuchung des Zerfalls

Die angeregten Proben werden nun wiederum mit der in 2 dargestellten Apparatur untersucht.

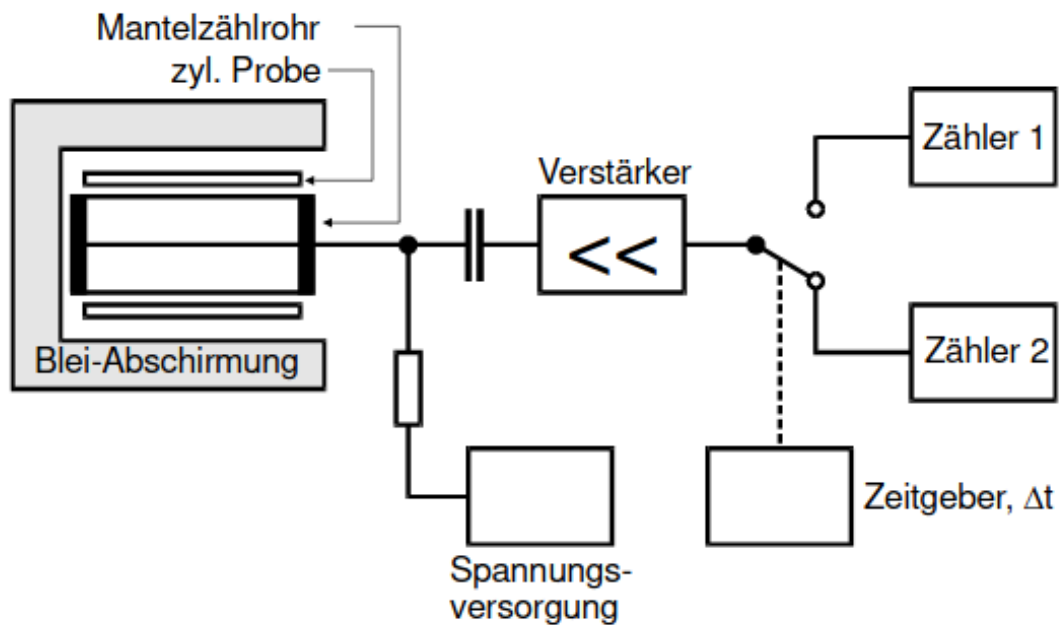


Abbildung 2: Versuchsaufbau.

Um die Umgebungsradioaktivität möglichst gering zu halten wird der Versuchsaufbau nach außen hin durch Blei abgeschirmt. Trotzdem existiert bereits ohne Probe ein Nulleffekt N_u , der insbesondere bei kleinen Zählraten vor der eigentlichen Messung bestimmt werden muss. Bei einem Ausschlag des Geiger-Müller-Zählrohrs wird am Verstärkerausgang ein elektrischer Impuls generiert. Dieser wird an ein elektronisches Zählwerk mit zwei Anzeigevorrichtungen weitergeleitet, sodass ununterbrochen gemessen werden kann.

3 Auswertung

3.1 Vanadium

Als Erstes sollte die Untergrundrate ermittelt werden, dazu wurde in 300s-Intervallen die Zerfallsrate gemessen. So ergaben sich $N_U = 129, 143, 144, 136, 126, 158$.

Anschließend wurde der Zerfall von ^{52}V gemessen. Dabei handelt sich um ein Isotop mit einfachem Zerfall. Als Zeitintervall wurde $\Delta t = 30\text{s}$ gewählt, sodass sich die in Tabelle 1 ergaben. Die Fehler wurden dabei durch die Poisson-Verteilung $\Delta N = \sqrt{N}$ ermittelt und im Weiteren über die Gauss'sche Fehlerrechnung nach

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=0}^n f(x_i)^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (6)$$

berechnet.

Tabelle 1: Messdaten für den Zerfall von Vanadium.

t / s	$N_{\Delta t, \text{gem}}$	$\Delta N_{\Delta t, \text{gem}}$
30.0	189.0	13.74
60.0	197.0	14.03
90.0	150.0	12.24
120.0	159.0	12.60
150.0	155.0	12.44
180.0	132.0	11.48
210.0	117.0	10.81
240.0	107.0	10.34
270.0	94.0	9.695
300.0	100.0	10.0
330.0	79.0	8.888
360.0	69.0	8.306
390.0	81.0	9.0
420.0	46.0	6.782
450.0	49.0	7.0
480.0	61.0	7.810
510.0	56.0	7.483
540.0	40.0	6.324
570.0	45.0	6.708
600.0	32.0	5.656
630.0	27.0	5.196
660.0	43.0	6.557
690.0	35.0	5.916
720.0	19.0	4.358
750.0	28.0	5.291
780.0	27.0	5.196
810.0	36.0	6.0
840.0	25.0	5.0
870.0	29.0	5.385
900.0	18.0	4.242
930.0	17.0	4.123
960.0	24.0	4.898
990.0	21.0	4.582
1020.0	25.0	5.0
1050.0	21.0	4.582
1080.0	24.0	4.898
1110.0	25.0	5.0
1140.0	17.0	4.123
1170.0	20.0	4.472
1200.0	19.0	4.358
1230.0	20.0	4.472
1260.0	18.0	4.242
1290.0	16.0	4.0
1320.0	17.0	4.123

Mithilfe des Mittelwertes der Messung für den Untergrund $N_U = \pm$ folgen die wahren Werte für $N_{\Delta t}$ wie in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Messwerte von Vanadium ohne Untergrundrate.

t / s	$N_{\Delta t}$	$\Delta N_{\Delta t}$
30.0	175.066	13.831
60.0	183.066	14.118
90.0	136.066	12.341
120.0	145.066	12.701
150.0	141.066	12.542
180.0	118.066	11.589
210.0	103.066	10.923
240.0	93.066	10.455
270.0	80.066	9.814
300.0	86.066	10.115
330.0	65.066	9.017
360.0	55.066	8.445
390.0	67.066	9.128
420.0	32.066	6.951
450.0	35.066	7.163
480.0	47.066	7.957
510.0	42.066	7.636
540.0	26.066	6.505
570.0	31.066	6.879
600.0	18.066	5.858
630.0	13.066	5.414
660.0	29.066	6.732
690.0	21.066	6.109
720.0	5.066	4.617
750.0	14.066	5.506
780.0	13.066	5.414
810.0	22.066	6.190
840.0	11.066	5.227
870.0	15.066	5.596
900.0	4.066	4.508
930.0	3.066	4.395
960.0	10.06	5.130
990.0	7.066	4.829
1020.0	11.06	5.227
1050.0	7.066	4.829
1080.0	10.06	5.130
1110.0	11.06	5.227
1140.0	3.066	4.395
1170.0	6.066	4.724
1200.0	5.066	4.617
1230.0	6.066	4.724
1260.0	4.066	4.508
1290.0	2.066	4.280
1320.0	3.066	4.395

Aus diesen Werten wurde mithilfe einer linearen Regression eine Kurve für den Zerfall von Vanadium errechnet, nach Formel (5) aus der Theorie. Es gilt:

$$\begin{aligned}\lambda &= (0.323 \pm 0.011) \cdot 10^(-2) \\ c &= 5.32 \pm 0.04 \\ \ln(N_{\Delta t}) &= c - \lambda t\end{aligned}$$

Aus dem Zerfallsparameter λ lässt sich die Halbwertszeit T_V von Vanadium berechnen nach (3).

$$T_V = 215 + / - 7\text{s}$$

Eine genauere Methode nimmt nicht alle Werte in die lineare Regression auf, dazu wurden alle Wertepaare nach der doppelten Halbwertszeit vernachlässigt. Es folgt

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= (0.333 \pm 0.022) \cdot 10^(-2) \\ c_2 &= 5.34 \pm 0.05 \\ \ln(N_{\Delta t}) &= c_2 - \lambda_2 t \\ T_{V,2} &= 208 + / - 13\end{aligned}$$

Abbildung 3 zeigt die Messwerte ohne Untergrund sowie die beiden linearen Regressionen.

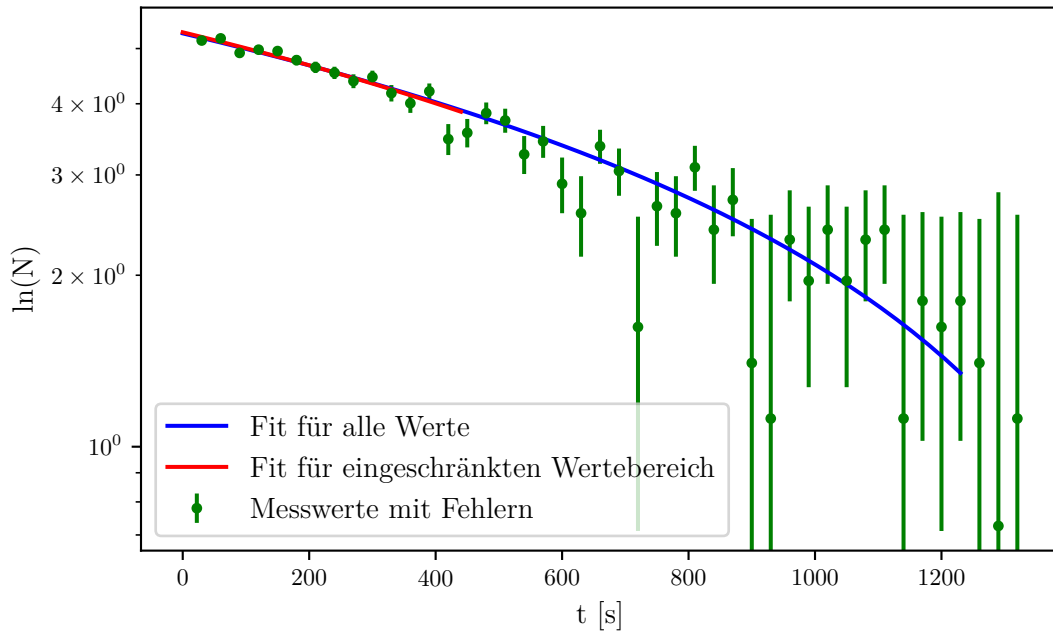


Abbildung 3: Messdaten und Fits für den Zerfall von Vanadium.

3.2 Rhodium

Für die Messung des Zerfalls von Rhodium wurde ein Zeitintervall von $\Delta t = 15\text{s}$ gewählt. Die Messdaten sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Nach abziehen der auf ein Zeitintervall von 15 Sekunden normierten Untergrundrate bleiben die in Tabelle 4 gezeigten Daten.

Nach Auftragen der Messwerte halblogarithmisch gegen die Zeit wie in Abbildung 4, ist eine Struktur erkennbar. Ab der Zeit $t_l = 270\text{s}$ ist nur noch der Zefall vom langlebigeren ^{104i}Rh von Bedeutung, während der Zerfall des kurzlebigeren Isotopes ^{104}Rh bis zur Zeit $t_s = 150\text{s}$ vorherrschend ist.

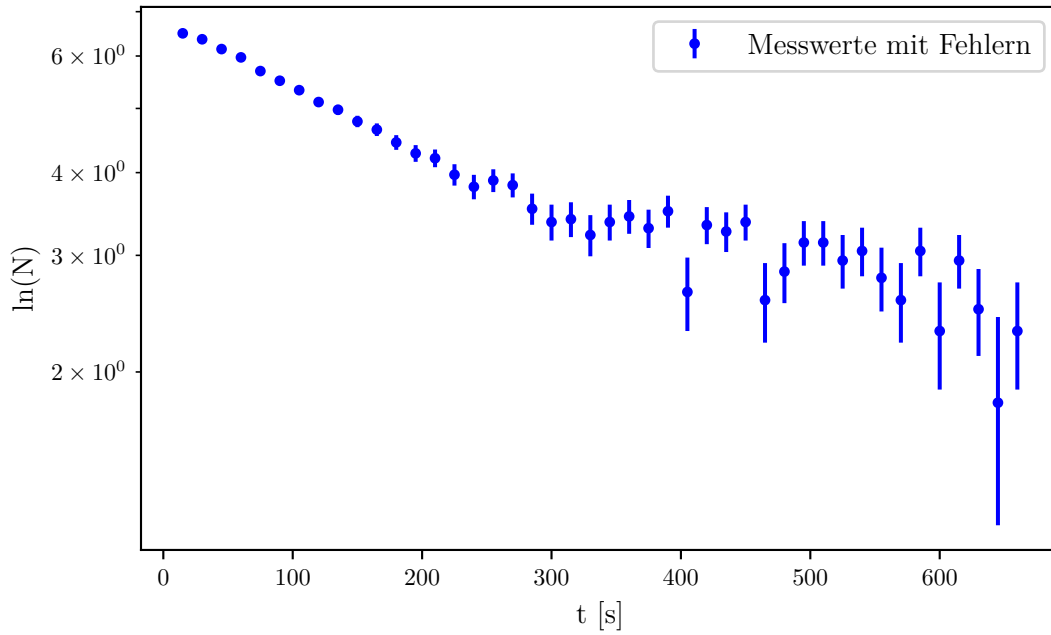


Abbildung 4: Messwerte des Rhodiumzerfalls mit Fehlern.

Für $t > t_l$ lässt sich die Kurve des langlebigen Zerfalls extrapolieren, sodass sie dargestellt werden kann mit

$$\lambda_l = (0.323 \pm 0.11) \cdot 10^{-2}$$

$$c_l = 4.35 \pm 0.17$$

$$\ln(N_{\text{langlebig}}) = c_l - \lambda_l \cdot t$$

Nach Abziehen des so erhaltenen Beitrages vom langlebigen Zerfall ist es möglich, auch eine Darstellung des kurzlebigen Zerfalls zu finden. Sie wird wie folgt charakterisiert.

$$\lambda_k = (1.61 \pm 0.04) \cdot 10^{-2}$$

$$c_k = 6.678 \pm 0.025$$

$$\ln(N_{\text{kurzlebig}}) = c_k - \lambda_k \cdot t$$

Tabelle 3: Messwerte von Rhodium.

t / s	$N_{\Delta t, \text{gem}}$	$\Delta N_{\Delta t, \text{gem}}$
15.0	667.0	25.826
30.0	585.0	24.186
45.0	474.0	21.771
60.0	399.0	19.974
75.0	304.0	17.435
90.0	253.0	15.905
105.0	213.0	14.594
120.0	173.0	13.152
135.0	152.0	12.328
150.0	126.0	11.224
165.0	111.0	10.535
180.0	92.0	9.591
195.0	79.0	8.888
210.0	74.0	8.602
225.0	60.0	7.745
240.0	52.0	7.211
255.0	56.0	7.483
270.0	53.0	7.280
285.0	41.0	6.403
300.0	36.0	6.0
315.0	37.0	6.082
330.0	32.0	5.656
345.0	36.0	6.0
360.0	38.0	6.164
375.0	34.0	5.830
390.0	40.0	6.324
405.0	21.0	4.582
420.0	35.0	5.916
435.0	33.0	5.744
450.0	36.0	6.0
465.0	20.0	4.472
480.0	24.0	4.898
495.0	30.0	5.477
510.0	30.0	5.477
525.0	26.0	5.099
540.0	28.0	5.291
555.0	23.0	4.795
570.0	20.0	4.472
585.0	28.0	5.291
600.0	17.0	4.123
615.0	26.0	5.099
630.0	19.0	4.358
645.0	13.0	3.605
660.0	17.0 ₁₃	4.123

Tabelle 4: Messwerte von Rhodium ohne Untergrund.

t / s	$N_{\Delta t}$	$\Delta N_{\Delta t}$
15.0	660.033	25.848
30.0	578.033	24.210
45.0	467.033	21.798
60.0	392.033	20.004
75.0	297.033	17.468
90.0	246.033	15.942
105.0	206.033	14.634
120.0	166.033	13.197
135.0	145.033	12.375
150.0	119.033	11.276
165.0	104.033	10.590
180.0	85.033	9.652
195.0	72.033	8.953
210.0	67.033	8.669
225.0	53.033	7.820
240.0	45.033	7.291
255.0	49.033	7.560
270.0	46.033	7.359
285.0	34.033	6.493
300.0	29.033	6.095
315.0	30.033	6.177
330.0	25.033	5.758
345.0	29.033	6.095
360.0	31.033	6.257
375.0	27.033	5.929
390.0	33.033	6.415
405.0	14.033	4.707
420.0	28.033	6.013
435.0	26.033	5.844
450.0	29.033	6.095
465.0	13.033	4.600
480.0	17.033	5.016
495.0	23.033	5.582
510.0	23.033	5.582
525.0	19.033	5.211
540.0	21.033	5.400
555.0	16.033	4.915
570.0	13.033	4.600
585.0	21.033	5.400
600.0	10.033	4.261
615.0	19.033	5.211
630.0	12.033	4.490
645.0	6.033	3.763
660.0	10.033	4.261

Abbildung 5 zeigt die jeweiligen Kurven für ihren Geltungsbereich sowie die Kombination aus beiden.

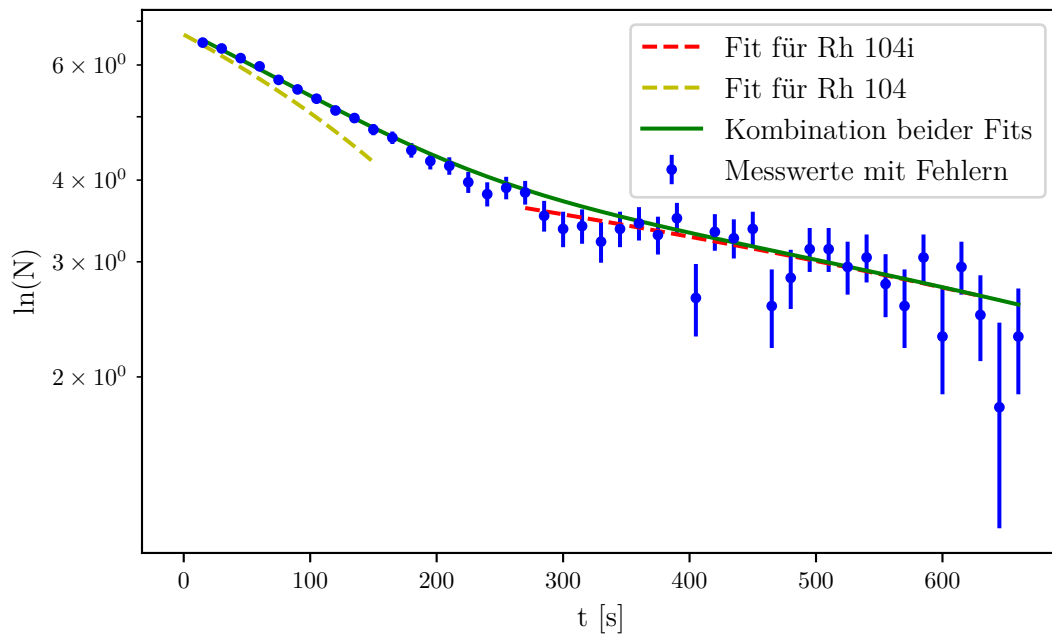


Abbildung 5: Regressionskurven für den Zerfall von Rhodium.

Als Halbwertszeiten ergeben sich aus den Zerfallskonstanten mithilfe der Gleichung (3)

$$T_l = 258.149 \pm 0.001\text{s}$$

$$T_k = 43.054 \pm 0.025\text{s}$$

4 Diskussion

Tabelle 5: Theoriewerte und prozentuale Abweichungen.

Wert	Theoriewert	Messung	Abweichung in Prozent
Halbwertszeit von Vanadium	224.4s	$215 \pm 7\text{s}$	10
Genauer gemessene Halbwertszeit von Va	224.4s	$208 \pm 13\text{s}$	17
Halbwertszeit von Rh 104	42.3s	$43.05 \pm 0.001\text{s}$	1.8
Halbwertszeit von Rh 104i	260s	$258.15 \pm 0.001\text{s}$	0.75

4.1 Vanadium

In Tabelle 5 werden die Theorie- und gemessenen Werte verglichen. Ungewöhnlich ist dabei, dass die Abweichung, die bei der prinzipiell genaueren Methode herauskommt, größer ist als bei der prinzipiell ungenaueren Methode. Der größere Fehler des Wertes lässt sich dadurch erklären, dass durch eine geringere Anzahl an Werten auch ein größerer statistischer Fehler entsteht. Außerdem ist die generelle Unsicherheit des Versuches recht hoch, beispielsweise durch die Auswirkungen einer möglicherweise nicht idealen Wahl von Δt für die Messung. Durch ein zu kleines Zeitintervall kann ein statistischer Fehler dazu kommen, während ein zu großes Zeitintervall zu einem systematischen Fehler in λ führen kann.

Zudem ist mit dem Zählrohr, das für die Messung des Zerfalls genutzt wurde, keine einwandfreie Messung möglich, da nach jeder Detektion für eine Totzeit keine Werte aufgenommen werden können. Dieser Effekt kommt zu Anfang der Messung mehr zum Tragen, da dann mehr Impulse in einem Zeitintervall aufgenommen werden.

Eine Verbesserung der Werte wäre außerdem durch eine längere Messung der Untergrundstrahlung möglich, um den statistischen Fehler zu verringern, oder durch bessere Abschirmung des Geiger-Müller-Zählrohres.

4.2 Rhodium

Auch für Rhodium werden die Messwerte in Tabelle 5 mit den Theoriewerten verglichen. In Abbildung 5, die die entsprechenden Kurven darstellt, ist die Güte dieser Werte auch erkennbar, da die zusammengesetzte Kurve genau durch die Datenpunkte verläuft.

Geringe Abweichungen bei den einzelnen Kurven für die jeweiligen Isotope kommen dadurch zustande, dass der Einfluss des anderen Isotops bei der realen Messung natürlich auch noch einen Einfluss hat, sodass die Werte nicht perfekt repräsentiert sind. Dies ist erst bei Kombination der Kurven der Fall.