

V702

# Aktivierung mit Neutronen

Sonia Chander  
sonia.chander@tu-dortmund.de

Jana Schlücking  
jana.schluecking@tu-dortmund.de

Durchführung: 26.01.2021

Abgabe: 02.02.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Kernreaktion . . . . .	3
2.2	Wirkungsquerschnitt . . . . .	3
2.3	Erzeugung Niederenergetischer Neutronen . . . . .	4
2.4	Untersuchung des Zerfalls instabiler Isotope . . . . .	4
2.5	Messapparatur . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>7</b>
3.1	Vanadium . . . . .	7
3.2	Rhodium . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1	Vanadium . . . . .	7
4.2	Rhodium . . . . .	9
4.3	Messwerte . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>15</b>
	<b>Literatur</b>	<b>15</b>

# 1 Zielsetzung

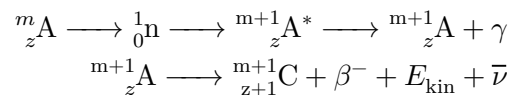
In diesem Versuch soll die Halbwertszeit  $T$  von Rhodium und Vanadium durch Beschuss stabiler Kerne mit Neutronen ermittelt werden.

## 2 Theorie

Sobald das Protonen und Neutronen Verhältnis außerhalb des Stabilitätsbereichs liegt, ist ein Atomkern instabil und zerfällt. Nuklide zerfallen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit in einen stabilen oder in einen weiteren instabilen Kern, der wiederum zerfällt. Durch die Halbwertszeit  $T$  kann diese Zerfallswahrscheinlichkeit ausgedrückt werden. In dieser Zeit zerfällt von einer großen Menge instabiler Kerne die Hälfte. Da die hier zu ermittelnden Halbwertszeiten zwischen Sekunden und Stunden liegen, werden die Nuklide kurz vor Messbeginn durch Beschießen von Kernen mit Neutronen hergestellt.

### 2.1 Kernreaktion

Kern A absorbiert ein Neutron, es entsteht ein Zwischenkern  $A^*$ . Dieser ist um die Energie des Neutrons größer als Kern A. Die Energie wird auf alle Nukleonen im Kern verteilt und erreichen dadurch höhere Energiezustände, auch Aufheizung des Zwischenkerns genannt. Da die Energie gleich verteilt ist, ist eine Abstoßung eines Nukleons nicht möglich bzw. sehr unwahrscheinlich, besonders bei einfallenden Neutronen mit niedriger Energie. Durch Emission eines Photons nach ca.  $10^{-16}$  s erlangt der Kern  $A^*$  wieder seinen Grundzustand. Dieser neue Kern ist aber aufgrund der erhöhten Neutronenanzahl instabil. Durch Aussendung des Photons verweilt er länger in diesem instabilen Zustand bis ein Elektron abgestoßen wird. Dadurch geht dieser Kern in einen stabilen Zustand über. Die restliche Masse wandelt sich nach Einsteinschen Beziehung in kinetische Energie um.



### 2.2 Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  beschreibt die Fläche, die ein Kern haben müsste, um jedes Neutron einzufangen, das die Fläche trifft. Er wird beschrieben durch:

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

wobei  $d$  die Dicke,  $K$  die Atome [cm],  $n$  die Neutronen pro Sekunde und  $u$  die Einfänge sind. Die Einheit von  $\sigma$  ist  $10^{-24} \text{ cm}^2 = 1 \text{ b}$ . Dieser Querschnitt hängt stark von der Geschwindigkeit des Neutrons ab. Genaugenommen besteht ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang zwischen dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  und der Neutronengeschwindigkeit  $v$ :

$$\sigma \sim \frac{1}{v}$$

Ein Neutron mit kleiner Geschwindigkeit bewegt sich somit länger in der Einwirkungssphäre des Kerns und wird dadurch wahrscheinlicher von diesem Kern eingefangen.

### 2.3 Erzeugung Niederenergetischer Neutronen

Niederenergetische Neutronen haben eine höhere Wahrscheinlichkeit vom Kern eingefangen zu werden. Nun müssen diese erzeugt werden, da sie nicht natürlich vorkommen. Das geschieht durch Kernreaktionen.  $\alpha$ -Teilchen aus dem Zerfall von  $^{226}\text{Ra}$ -Kernen werden auf  $^9\text{Be}$ -Kerne geschossen um Neutronen zu erhalten. Die durch den Beschuss entstandenen Neutronen können Energien von bis zu 13,7 MeV haben. Deswegen werden sie mithilfe von elastischen Stößen abgebremst. Hierzu sollen die Neutronen in eine dicke Materieschicht eindringen um durch die Stöße abgebremst zu werden. Um eine effektive Abbremsung durchzuführen, soll die Masse der Neutronen und der Materieschicht so ähnlich wie möglich sein. Der Mantel der Neutronenquelle besteht somit aus Paraffin (siehe Abbildung 1) Nach mehreren Stößen zwischen einem Neutronen und den Paraffin-Protonen wird es zu einem sogenannten thermischen Neutron. Seine Energie beträgt dann bei einer Temperatur  $T = 290\text{ K}$  etwa  $0,025\text{ eV}$ .

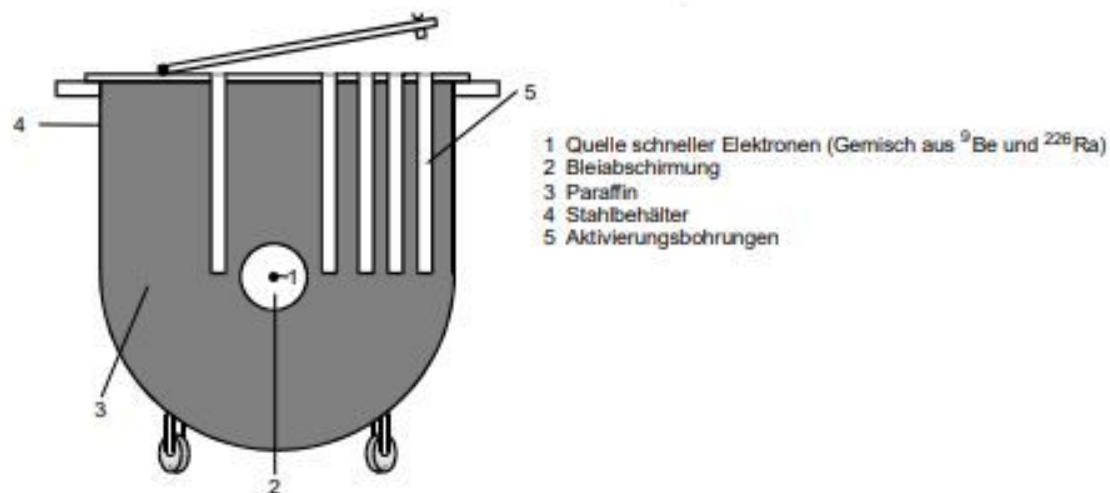


Abbildung 1: Querschnitt der Neutronenquelle.[1]

### 2.4 Untersuchung des Zerfalls instabiler Isotope

Die Halbwertszeiten von Rhodium und Vanadium sollen ermittelt werden. Dazu werden Proben, die die Nuklide enthalten, in die Aktivierungsschächte der Neutronenquelle eingelegt. Durch  $\beta^-$ -Zerfall gehen die instabilen Isotope in stabile über. Zur Bestimmung

der Halbwertszeit wird die Funktion des radioaktiven Zerfalls benötigt:

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

Sie beschreibt die Anzahl der noch nicht zerfallenen Kerne zum Zeitpunkt  $t$ .  $N_0$  ist die Anzahl der instabilen Kerne zu Beginn der Messung.  $\lambda$  ist ein Ausdruck für die Zerfallswahrscheinlichkeit und wird Zerfallskonstante genannt. Die Halbwertszeit  $T$  kann dann mit der Gleichung (1) beschrieben werden:

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

$$\Rightarrow T = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (3)$$

Da sich  $N(t)$  schwer ermitteln lässt, wird  $N_{\Delta t}(t)$  eingeführt.  $N_{\Delta t}(t)$  beschreibt die zerfallenen Kerne in einem festen Zeitintervall  $\Delta t$ . Es gilt:

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

und mit Gleichung (1) folgt:

$$\begin{aligned} N_{\Delta t}(t) &= N_0(1 - e^{-\lambda \Delta t})e^{-\lambda t} \\ \Leftrightarrow \ln(N_{\Delta t}(t)) &= -\lambda t \ln(N_0(1 - e^{-\lambda \Delta t})) \end{aligned}$$

Bei den Messungen ist auf die Wahl  $\Delta t$  zu achten. Wird  $\Delta t$  zu klein gewählt, entstehen statistische Fehler für  $N_{\Delta t}(t)$ . Bei zu großen  $\Delta t$  kommen systematische Fehler bei  $\lambda$  auf.

Zusätzlich weist Rhodium eine Besonderheit auf. Wird Rhodium aus 100% Isotop  $^{103}\text{Rh}$  aktiviert, geht dieser mit 90% Wahrscheinlichkeit in das instabile Isotop  $^{104}\text{Rh}$  über. Mit 10% Wahrscheinlichkeit entsteht das instabile Isotop  $^{104\text{i}}\text{Rh}$ , das ein  $\gamma$ -Quant aussendet und dann in  $^{104}\text{Rh}$  übergeht. Diese Zerfälle laufen parallel mit unterschiedlichen Halbwertszeiten ab.

Die Erzeugung und der Zerfall der zu untersuchenden Isotope ist in Abbildung 2 zu sehen.

## 2.5 Messapparatur

In der Abbildung 3 ist der Aufbau der Messapparatur zu sehen. Mithilfe eines Geiger-Müller-Zählrohrs können die ausgesendeten  $\beta$ - und  $\gamma$ -Teilchen nachgewiesen werden. Um den Nulleffekt zu verringern befindet sich um das Zählrohr ein Abschirmblock aus Blei. Sobald ein Teilchen registriert wird, wird ein Impuls an ein elektronisches Zählwerk weitergeleitet. Aufgrund der zwei Anzeigen wird die Messung nicht unterbrochen. Nachdem die eingestellte Messzeit  $\Delta t$  vorüber ist, wird innerhalb von 100 ns die Anzeige gewechselt. Vor dem Einlegen einer Probe kann der Nulleffekt  $N_u$  durch Höhenstrahlung und natürliche Radioaktivität gemessen werden.

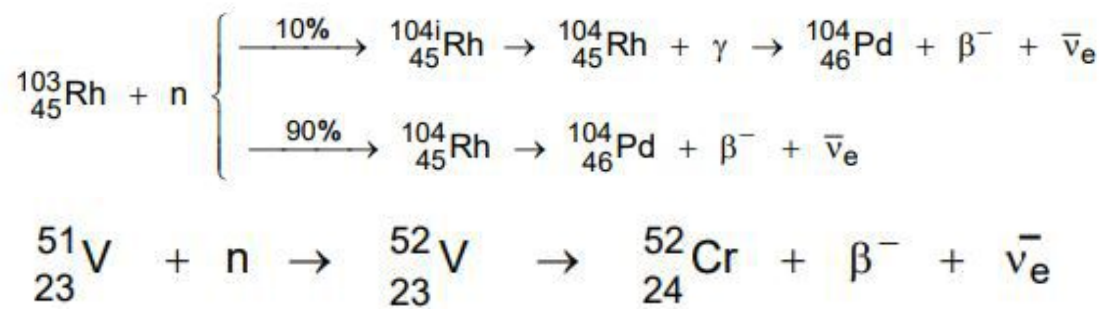


Abbildung 2: Erzeugung und Zerfall von Rhodium und Vanadium. [1]

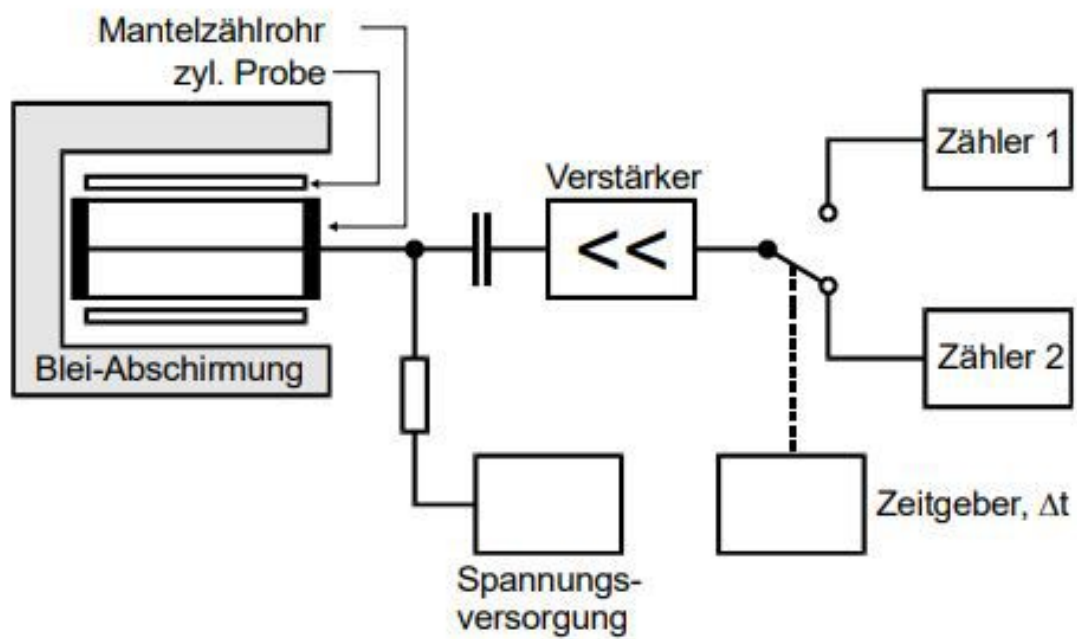


Abbildung 3: Schematischer Versuchsaufbau.[1]

### 3 Durchführung



Abbildung 4: Versuchsaufbau vor Ort.[1]

Der Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 4 mit den Messapparaturen zu sehen. Zunächst wird der Nulleffekt mehrfach in Abständen von 300 s gemessen.

#### 3.1 Vanadium

Die Vanadium Probe wird aktiviert, aus der Neutronenquelle wieder entnommen und auf das Geiger-Müller-Zählrohr gesteckt. Die Messung startet mit einem Messintervall von 30 s.

#### 3.2 Rhodium

Ähnlich wie in Abschnitt 3.1 wird die Probe aktiviert, aus der Neutronenquelle entnommen und auf das Zählrohr gesteckt. Diese Messung wird in einem Messintervall von 15 s durchgeführt.

### 4 Auswertung

Zuerst wurde die Untergrundrate mit einem Messintervall  $t = 300$  s ermittelt. Die Messwerte finden sich in der Tabelle 1.

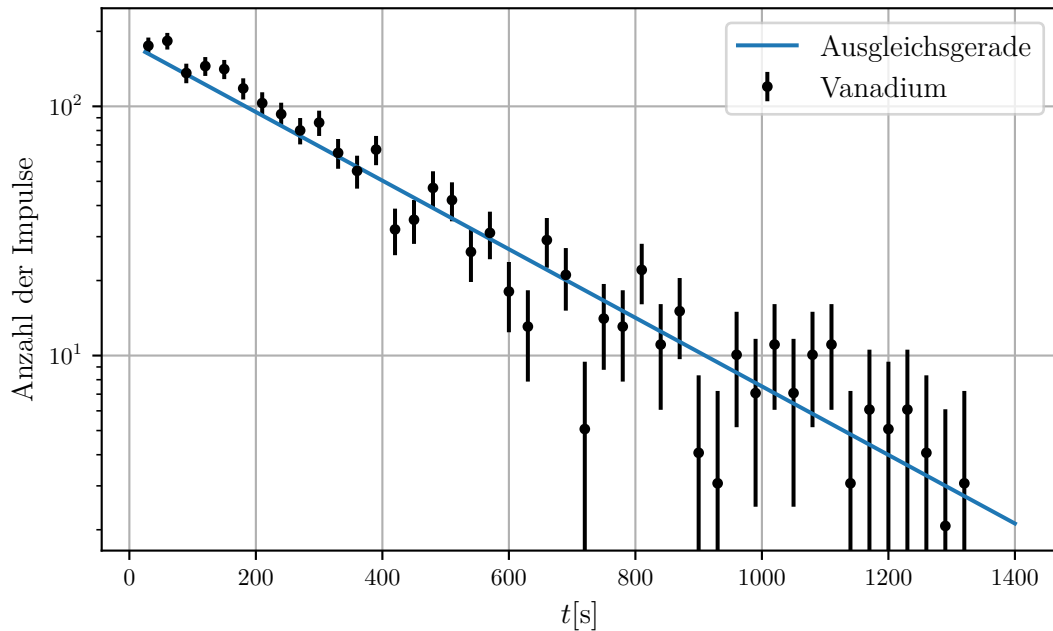
#### 4.1 Vanadium

Bei der Vanadiumprobe wurde in Zeitabständen von  $\Delta t = 30$  s die in den Zeitabschnitten aufgenommenen Impulse notiert. Die Messwerten lassen sich in Tabelle 2 finden. Die

Untergrundrate für dieses Messintervall ergibt sich zu:

$$N_{U,30s} = 13,9 \pm 0,4$$

Die durch die Untergrundrate bereinigten Messwerte wurden anschließend in einem  $t$ - $N$ -



**Abbildung 5:** Die Messwerte der Vanadiumprobe mit einer linearen Ausgleichsgeraden in einem Halblogarithmischen Diagramm.

Diagramm halblogarithmisch aufgetragen. Dies ist in der Abbildung 5 zu finden. Außerdem wurde eine Ausgleichsrechnung mit python der Form  $\log(N) = a \cdot t + c$  durchgeführt. Die Parameter ergeben sich zu :

$$a = (-1,38 \pm 0,70) \cdot 10^{-3} \frac{1}{s}$$

$$c = 2,25 \pm 0,06$$

Damit die Halbwertszeit ausgerechnet werden kann, müssen die Parameter von der dekadisch logarithmischen Darstellung in die natürliche Basis umgerechnet werden. In der natürlichen Basis lauten diese dann:

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

$$c = 5,19 \pm 0,13$$

Mit (3) ergibt sich die Halbwertszeit von Vanadium zu:

$$T = \frac{\ln(2)}{\lambda} = (219 \pm 11) s$$

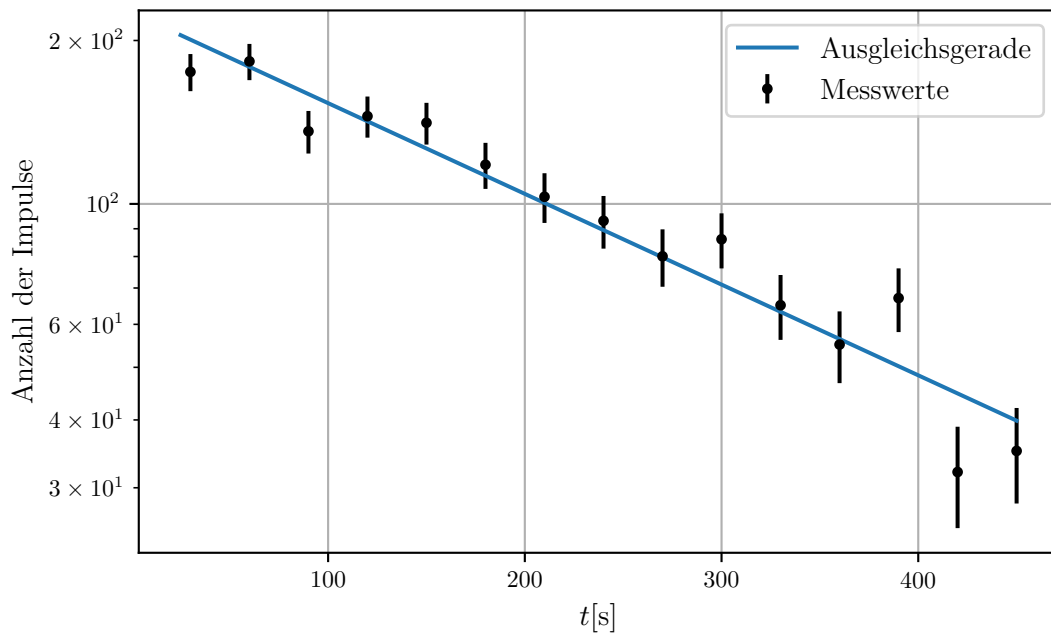


Da die letzten Zeitintervalle geringe Zählraten haben, werden die Messwerte von Vanadium bis  $t = 450\text{ s}$  nochmals geplottet und mit einer Funktion der Form  $\log(N) = a \cdot t + c$  genähert. Die Ausgleichsrechnung erfolgt mit python und ergibt in der dekadisch logarithmischen Darstellung:

$$a = (-1,67 \pm 0,13) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$$

$$c = 2,35 \pm 0,04$$

Dies ist in der Abbildung 6 geplottet. Nach der Umrechnung in die natürliche Basis folgt



**Abbildung 6:** Die Messwerte der Vanadiumprobe bis zur vorher ausgerechneten doppelten Halbwertszeit in einem halblogarithmischen Diagramm.

für die Ausgleichsrechnung:

$$\ln(N) = ((-3,85 \pm 0,31) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}) \cdot t + (5,42 \pm 0,08)$$

Somit errechnet sich die Halbwertszeit nach (3) bei dieser Auswahl der Messwert zu:

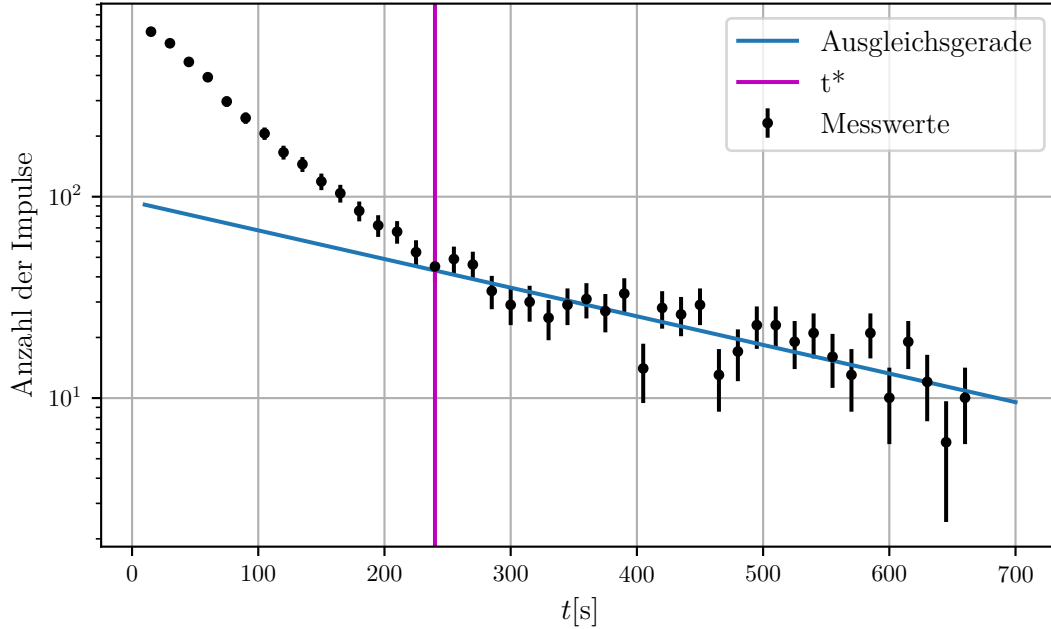
$$T = (180 \pm 14) \text{ s}$$

## 4.2 Rhodium

Die Rhodiumprobe wurde mit einem Messintervall von  $t = 15\text{ s}$  ausgemessen, so dass sich die Untergrundrate zu

$$N_{\text{U},15\text{s}} = 6,96 \pm 0,19$$

ergibt. Die Messwerte der Rhodiumprobe, sowie die um die Untergrundrate bereinigten Messwerte sind in der Tabelle 3 zu finden. Anschließend wurden die Messwerte halblogarithmisch in ein Diagramm aufgetragen, siehe Abbildung 7. Da Rhodium in  $^{104}\text{Rh}$  und



**Abbildung 7:** Die Messwerte von Rhodium mit einer Ausgleichsrechnung für den langlebigen Zerfall in einem halblogarithmischen Diagramm.

$^{104}\text{Rh}$  zerfällt, wird zuerst der langlebige Zerfall betrachtet. Der Zeitpunkt, in dem nur noch der langlebige Zerfall vorliegt, wurde in Abbildung 7 zu  $t^* = 240\text{ s}$  bestimmt. Für die darauf folgenden Werte wurde eine Ausgleichsrechnung der Form  $\log(N) = a \cdot t + c$  mit python durchgeführt. Die Parameter ergeben sich zu:

$$a = (-1,42 \pm 0,17) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$$

$$c = 1,97 \pm 0,08$$

Nachdem die Steigung in die natürliche Basis umgerechnet wurde, lautet die lineare Abbildung

$$\ln(N) = (-3,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \cdot t + (4,55 \pm 0,19) \quad (4)$$

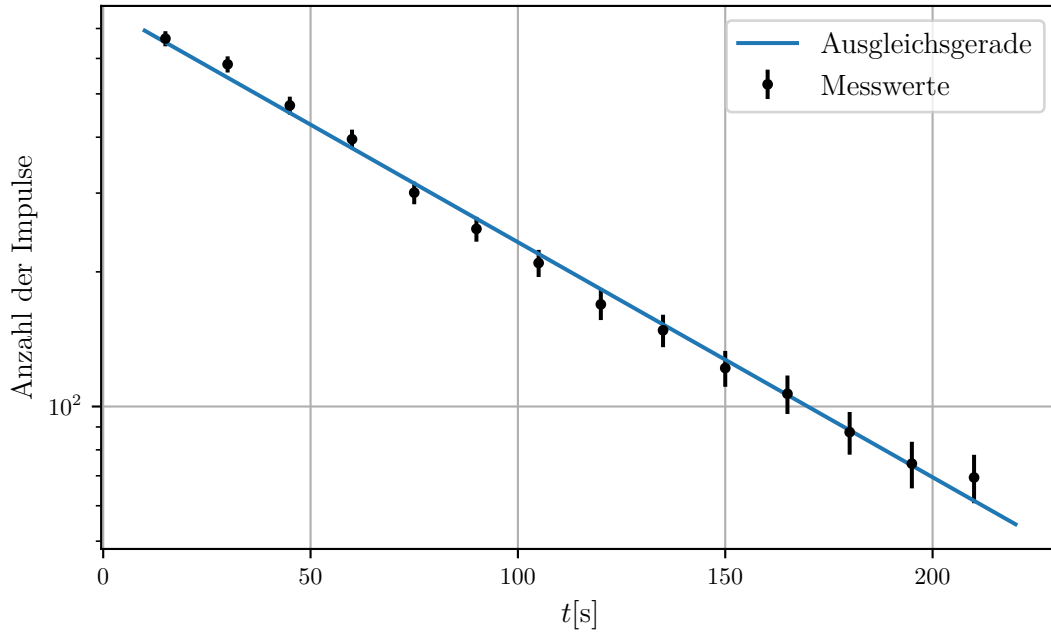
und die Halbwertszeit für den langlebigen Zerfall berechnet sich nach (3) zu:

$$T_{\text{H},l} = (212 \pm 26) \text{ s}$$

Die Zerfallsrate für den langlebige Zerfall von Rhodium lautet somit:

$$N_{\Delta t, \text{lang}}(t) = (-4,7 \pm 1,1) \cdot \exp((0,0033 \pm 0,0004)t)$$

Zur Betrachtung des kurzlebigen Zerfalls wird nun die Zerfallsrate des langlebigen Zerfalls von der Gesamtanzahl für Zeiten bis  $t = 210\text{ s}$  abgezogen. Diese Werte wurden halblogarithmisch in ein Diagramm getragen (siehe Abbildung 8) und mit einer Funktion der Form  $\log(N) = a \cdot t + c$  angenähert.



**Abbildung 8:** Zur Ermittlung der Halbwertszeit des kurzlebigen Zerfalls von Rhodium wurden die Differenz der um die Untergrundrate bereinigten Messwerte und der für diesen Zeitpunkt berechneten Zerfallsrate des langlebigen Zerfalls gegen die Zeit aufgetragen.

Die Ausgleichsgerade wurde mit python ermittelt und lautet in dekadisch logarithmischer Darstellung:

$$a = (-5,26 \pm 0,11) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$$

$$c = 2,893 \pm 0,014$$

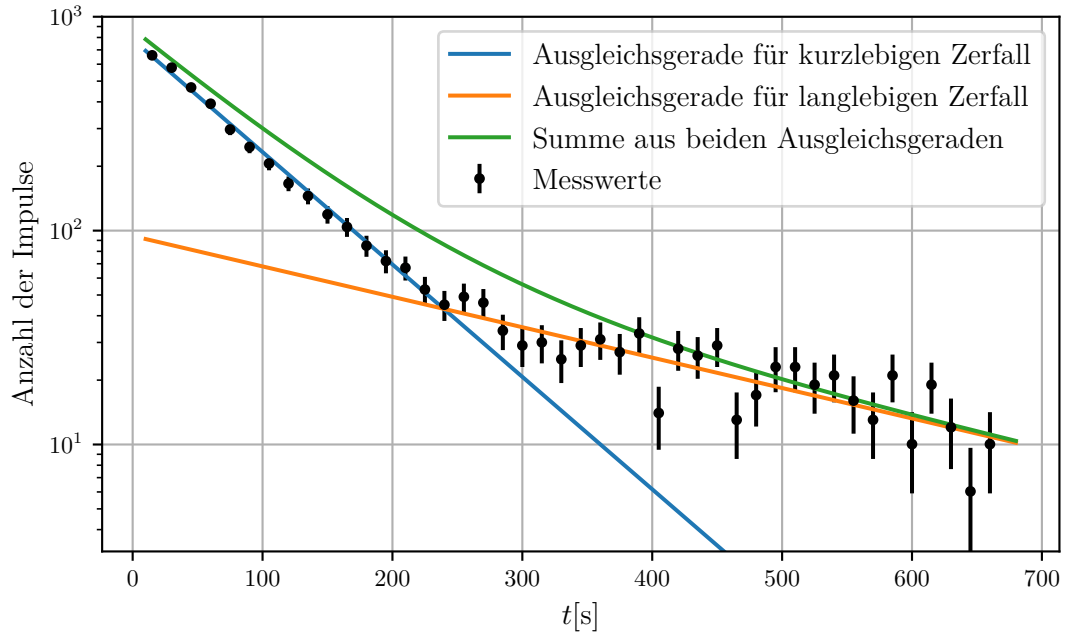
In der natürlichen Basis lässt sich die Ausgleichsgerade so schreiben:

$$\ln(N) = ((-0,01210 \pm 0,00025) \frac{1}{\text{s}}) \cdot t + (6,661 \pm 0,032) \quad (5)$$

Damit berechnet sich die Halbwertszeit des kurzlebigen Zerfalls nach (3) zu:

$$T_{\text{H,k}} = (57,3 \pm 1,2) \text{ s}$$

Abschließend sind in der Abbildung 9 die Messwerte der Rhodiumprobe neben der Ausgleichsgeraden für den langlebigen Zerfall (4), für den kurzlebigen Zerfall (5) und deren Summe in einem halblogarithmischen  $t$ - $N$ -Diagramm abgebildet.



**Abbildung 9:** Die Messwerte der Rhodiumprobe sowie die einzelnen Ausgleichsgeraden und deren Summe in einem halblogarithmischen Diagramm.

### 4.3 Messwerte

Die Messwerte der einzelnen Proben sind jeweils angegeben und zusätzlich die mit der Untergrundrate bereinigten Impulszahl inklusive der Messunsicherheit.

**Tabelle 1:** Die Werte der Messung zur Untergrundrate.

$t[s]$	$N_U$
300	129
600	143
900	144
1200	136
1500	139
1800	126
2100	158

**Tabelle 2:** Die gemessenen Impulszahlen der Vanadiumprobe.

$t[s]$	$N_{\text{gemessen}}$	$N$
30,0	189,0	$175,1 \pm 13,2325$
60,0	197,0	$183,1 \pm 13,5314$
90,0	150,0	$136,1 \pm 11,6662$
120,0	159,0	$145,1 \pm 12,0457$
150,0	155,0	$141,1 \pm 11,8786$
180,0	132,0	$118,1 \pm 10,8674$
210,0	117,0	$103,1 \pm 10,1538$
240,0	107,0	$93,1 \pm 9,6488$
270,0	94,0	$80,1 \pm 8,9499$
300,0	100,0	$86,1 \pm 9,2790$
330,0	79,0	$65,1 \pm 8,0685$
360,0	69,0	$55,1 \pm 7,4229$
390,0	81,0	$67,1 \pm 8,1915$
420,0	46,0	$32,1 \pm 5,6657$
450,0	49,0	$35,1 \pm 5,9245$
480,0	61,0	$47,1 \pm 6,8629$
510,0	56,0	$42,1 \pm 6,4885$
540,0	40,0	$26,1 \pm 5,1088$
570,0	45,0	$31,1 \pm 5,5767$
600,0	32,0	$18,1 \pm 4,2544$
630,0	27,0	$13,1 \pm 3,6194$
660,0	43,0	$29,1 \pm 5,3944$
690,0	35,0	$21,1 \pm 4,5935$
720,0	19,0	$5,1 \pm 2,2583$
750,0	28,0	$14,1 \pm 3,7550$
780,0	27,0	$13,1 \pm 3,6194$
810,0	36,0	$22,1 \pm 4,7011$
840,0	25,0	$11,1 \pm 3,3317$
870,0	29,0	$15,1 \pm 3,8859$
900,0	18,0	$4,1 \pm 2,0249$
930,0	17,0	$3,1 \pm 1,7607$
960,0	24,0	$10,1 \pm 3,1780$
990,0	21,0	$7,1 \pm 2,6646$
1020,0	25,0	$11,1 \pm 3,3317$
1050,0	21,0	$7,1 \pm 2,6646$
1080,0	24,0	$10,1 \pm 3,1780$
1110,0	25,0	$11,1 \pm 3,3317$
1140,0	17,0	$3,1 \pm 1,7607$
1170,0	20,0	$6,1 \pm 2,4698$
1200,0	19,0	$5,1 \pm 2,2583$
1230,0	20,0	$6,1 \pm 2,4698$
1260,0	18,0	$4,1 \pm 2,0249$
1290,0	16,0	$2,1 \pm 1,4492$
1320,0	17,0	$3,1 \pm 1,7607$

**Tabelle 3:** Die gemessenen Impulszahlen der Rhodiumprobe.

$t[s]$	$N_{\text{gemessen}}$	$N$
15,0	667,0	$660,04 \pm 25,6912$
30,0	585,0	$578,04 \pm 24,0425$
45,0	474,0	$467,04 \pm 21,6111$
60,0	399,0	$392,04 \pm 19,8$
75,0	304,0	$297,04 \pm 17,2348$
90,0	253,0	$246,04 \pm 15,6857$
105,0	213,0	$206,04 \pm 14,3541$
120,0	173,0	$166,04 \pm 12,8857$
135,0	152,0	$145,04 \pm 12,0433$
150,0	126,0	$119,04 \pm 10,9105$
165,0	111,0	$104,04 \pm 10,2000$
180,0	92,0	$85,04 \pm 9,2217$
195,0	79,0	$72,04 \pm 8,4876$
210,0	74,0	$67,04 \pm 8,1878$
225,0	60,0	$53,04 \pm 7,2829$
240,0	52,0	$45,04 \pm 6,7112$
255,0	56,0	$49,04 \pm 7,0029$
270,0	53,0	$46,04 \pm 6,7853$
285,0	41,0	$34,04 \pm 5,8344$
300,0	36,0	$29,04 \pm 5,3889$
315,0	37,0	$30,04 \pm 5,4809$
330,0	32,0	$25,04 \pm 5,0040$
345,0	36,0	$29,04 \pm 5,3889$
360,0	38,0	$31,04 \pm 5,5714$
375,0	34,0	$27,04 \pm 5,2$
390,0	40,0	$33,04 \pm 5,7480$
405,0	21,0	$14,04 \pm 3,7470$
420,0	35,0	$28,04 \pm 5,2953$
435,0	33,0	$26,04 \pm 5,1029$
450,0	36,0	$29,04 \pm 5,3889$
465,0	20,0	$13,04 \pm 3,6111$
480,0	24,0	$17,04 \pm 4,1280$
495,0	30,0	$23,04 \pm 4,8$
510,0	30,0	$23,04 \pm 4,8$
525,0	26,0	$19,04 \pm 4,3635$
540,0	28,0	$21,04 \pm 4,5869$
555,0	23,0	$16,04 \pm 4,0050$
570,0	20,0	$13,04 \pm 3,6111$
585,0	28,0	$21,04 \pm 4,5869$
600,0	17,0	$10,04 \pm 3,1686$
615,0	26,0	$19,04 \pm 4,3635$
630,0	19,0	$12,04 \pm 3,4699$
645,0	13,0	$6,04 \pm 2,4576$
660,0	17,0	$10,04 \pm 3,1686$

## 5 Diskussion

**Tabelle 4:** Vergleich der errechneten Halbwertszeiten mit denen aus der Literatur.

	$T_{\text{H,theo}}[\text{s}]$	$T_{\text{H,exp}}[\text{s}]$	$\Delta T$
Vanadium			
komplett	224,6[2]	219	2,5 %
Auswahl		180	19,85 %
Rhodium			
langlebig	260 [3]	212	18,46 %
kurzlebig	43,2[4]	57,3	24,67 %

In der Tabelle 4 sind die im Experiment ermittelten Werte für die jeweiligen Halbwertszeiten, die Literaturwerte der Halbwertszeiten und die prozentuale Abweichung dieser Werte angegeben. Bei der Vanadiumprobe wurde auf zwei verschiedene Arten die Halbwertszeit ermittelt werden, wobei die zweite Methode auf einen genaueren Wert führen sollte. Dies ist in dem Experiment nicht der Fall gewesen. Es ist davon auszugehen, dass die Halbwertszeit aus der ersten, ungenaueren, Bestimmung nur zufällig näher am Literaturwert liegt.

Bei der Rhodiumprobe weichen beide Werte ungefähr 20 % von ihrem Literaturwert ab. Hier die größte zusätzliche Fehlerquelle die ungenaue Bestimmung von  $t^*$ . Der Zeitpunkt, ab dem der langlebige Zerfall überwiegt, ist in der Abbildung 7 nicht klar sichtbar und kann nur vermutet werden.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch V702*. 2021.
- [2] René Rauscher Periodensystem online. URL: <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=isotope&el=23&mz=52&show=nuklid&sel=zf> (besucht am 31.01.2021).
- [3] René Rauscher Periodensystem online. URL: <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=isotope&el=45&mz=104&nrg=0.129&show=nuklid> (besucht am 31.01.2021).
- [4] René Rauscher Periodensystem online. URL: <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=isotope&el=45&mz=104&nrg=0&show=nuklid&sel=> (besucht am 31.01.2021).