Praktikumsprotokoll

Versuch Nr. 702
Aktivierung mit Neutronen

Frank Hommes
und
Kilian Klug

Durchgeführt am:
6. Juli 2004

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **3**

2 Theoretische Hintergründe **3**
2.1 Zur Herstellung instabiler Kerne 3
2.2 Die eigentlichen Kernreaktionen 5
2.3 Bestimmung der Halbwertszeit 6

3 Durchführung und Auswertung **8**
3.1 Nullrate 9
3.2 Messreihen 9

4 Anhang **11**

1 Einleitung

In diesem Experiment soll der Zerfall instabiler Atomkerne untersucht werden. Das Ziel ist es, Zerfallskurven aufzunehmen und die Halbwertszeiten der untersuchten Nuklide zu bestimmen.

2 Theoretische Hintergründe

Atome sind aus einer Elektronen-Hülle und einem wesentlich kleineren und schwereren Kern aufgebaut. Dieser Kern, bestehend aus Protonen und Neutronen, ist nur stabil, wenn das Verhältnis der Neutronen- und Protonenzahlen innerhalb enger Grenzen liegt. Ist dies nicht gegeben, so zerfällt der Kern. Dabei kann neben verschiedenen einzelnen Teilchen ein stabiler Kern oder auch ein neuer instabiler Kern entstehen, der dann ebenfalls nach einer gewissen Zeit zerfällt. Betrachtet man eine sehr große Zahl von instabilen Kernen kann man die Zeit angeben, nach der die Hälfte aller vorhandenen Kerne zerfallen ist. Diese Zeit nennt man die Halbwertszeit T. Ist die Halbwertszeit relativ gering, so ist davon auszugehen, dass natürliche Vorkommen des entsprechenden instabilen Kerns bereits zerfallen sind. Für eine experimentelle Bestimmung der Halbwertszeit müssen also erst einige instabile Kerne hergestellt werden.

2.1 Zur Herstellung instabiler Kerne

Der einfachste Weg instabile, für das Experiment geeignete Kerne zu erzeugen, ist, stabile Kerne eines Elementes mit langsamen Neutronen zu beschießen. Neutronen eignen sich hier besonders gut, da sie elektrisch neutral sind und somit nicht die Coulomb-Barriere überwinden müssen. Da jedoch nicht jedes Neutron von einem Kern eingefangen wird, definiert man den sogenannten Wirkungsquerschnitt σ. Dieser beschreibt die Fläche, die ein Kern haben müsste, damit jedes auf diese Fläche treffende Neutron eingefangen würde. Treffen n Neutronen, von denen u Stück eingefangen werden, pro Sekunde auf eine Folie der Dicke d mit K Atomen pro Kubikzentimeter, so gilt

$$\sigma = \frac{u}{nKd} \quad . \tag{1}$$

Man stellt fest, dass der Wirkungsquerschnitt abhängig ist von der Geschwindigkeit der Neutronen. Man unterscheidet im Wesentlichen zwischen schnellen und langsamen Neutronen, wobei die De-Broglie-Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{m_n v} \tag{2}$$

als Kriterium dient. Bei bestimmten Geschwindigkeiten tritt quantenmechanisch betrachtet Resonanzabsorption auf und zwar genau dann, wenn die Energie des einfallenden Neutrons gleich der Differenz zweier Energienieveaus ist. Damit kann man den Wirkungsquerschnitt in Abhängigkeit von der Energie beschreiben durch

$$\sigma(E) = \sigma_0 \sqrt{\frac{E_{r_i}}{E}} \frac{\tilde{c}}{(E - E_{r_i})^2 + \tilde{c}} \tag{3}$$

($\tilde{c}$, σ_0=charakteristische Konstanten der Kernreaktion; E_{r_i}=Energieniveaus des Zwischenkerns). Wenn E $\ll$ E$_r$ ist, kann man näherungsweise annehmen, dass der Wirkungsquerschnitt umgekehrt proportional zur Neutronengeschwindigkeit ist:

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{1}{v} \quad . \tag{4}$$

Aus diesen Betrachtungen folgt, dass es besonders günstig ist niederenergetische, d.h. langsame Neutronen zu benutzen. Um diese zu erzeugen, werden hier ^{9}Be-Kerne mit α-Teilchen beschossen:

$$^9_4\mathrm{Be} + ^4_2\alpha \rightarrow ^{12}_6\mathrm{C} + ^1_0\mathrm{n} \quad . \tag{5}$$

Die α-Teilchen stammen dabei aus dem Zerfall von ^{226}Ra-Kernen. Die entstandenen Neutronen werden durch elastische Stöße in einem umgebenden Material abgebremst. Am wirkungsvollsten sind dabei Stoffe, in denen die Stoßpartner der Neutronen möglichst die gleiche Masse haben wie ein Neutron - also Wasserstoff. Zum Einsatz kommt in diesem Fall der Kohlenwasserstoff Parafin in dem die Energie der Neutronen auf etwa Umgebungsniveau gebracht wird, also etwa 290K, entsprechend 0,025eV oder 2,2km/sec.

Der Aufbau der Neutronen-Quelle ist in Abb.1 dargestellt.

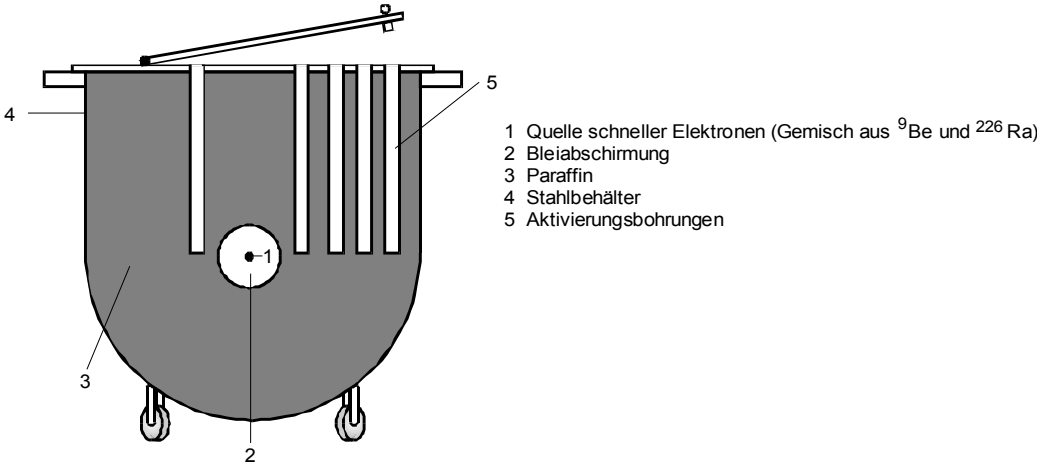


Abbildung 1: Querschnitt durch die hier verwendete Quelle für thermische Neutronen

2.2 Die eigentlichen Kernreaktionen

Trifft nun also ein, wie oben beschrieben, erzeugtes Neutron auf einen Kern A und wird von diesem eingefangen, dann wird es Bestandteil dieses Kerns. Der so durch Absorption eines Neutrons entstehende neue Kern A* heisst Zwischenkern oder Compoundkern. A* befindet sich in einem angeregten Zustand, da er die kinetische Energie und die Bindungsenergie aufgenommen hat. Dieser Zustand ist im allgemeinen nicht stabil, so dass der Zwischenkern zerfällt. Da die aufgenommene Energie sich auf alle Kernbestandteile verteilt, kann kein Nukleon abgestoßen werden. Stattdessen geht der angeregte Kern - auch Isomer genannt - zunächst unter Emission eines γ-Quants in seinen Grundzustand über:

$$ {}^{m}_{z}A + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{m+1}_{z} A^{*} \rightarrow {}^{m+1}_{z} A + \gamma \tag{6} $$

Ist auch der neue Kern nicht stabil, wandelt er sich durch Aussendung eines Elektrons in einen stabilen Kern um:

$$ {}^{m+1}_{z}A \rightarrow {}^{m+1}_{z+1} C + \beta^{-} + E_{kin} + \overline{\nu}_{e} \tag{7} $$

Allgemein unterscheidet man neben dem γ-Zerfall nach (6) noch zwei weitere Arten von Zerfällen:

- α-Zerfall Beim α-Zerfall wird ein α-Teilchen (Helium-Kern) ausgesendet:

$$ {}^{m}_{z}A + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{m-4}_{z-2} A^{*} + {}^{4}_{2}\alpha \tag{8} $$

- β-Zerfall Der β-Zerfall beschreibt den Zerfall eines Neutrons (oder Protons) im Kern. Man unterscheidet hier wiederum zwei Arten. Dabei entsteht neben einem Proton (bzw. einem Neutron) entweder ein β^-- oder ein β^+-Teilchen - also ein Elektron oder ein Positron:

$$^1_0n \rightarrow ^1_1 p + \beta^- + \overline{\nu}_e \tag{9}$$

$$^1_1p \rightarrow ^1_0 n + \beta^+ + \nu_e \tag{10}$$

  $\overline{\nu}_e$ und ν_e sind (Anti-)Neutrinos die ebenfalls enstehen aufgrund der Drehimpulserhaltung.

Einige Beispiele für mögliche Prozesse mit für Experimente geeigneten Halbwertszeiten (zwischen Sekunden und Stunden) sind in Abb.2 aufgeführt.

2.3 Bestimmung der Halbwertszeit

Man kann zeigen, dass die Zahl der zu einem Zeitpunkt t noch nicht zerfallenen Kerne N(t) durch

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \tag{11}$$

gegeben ist. Dabei ist N_0 die Zahl der zur Zeit t=0 vorhandenen instabilen Kerne und λ die sogenannte Zerfallskonstante. Für die Halbwertszeit T gilt

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad . \tag{12}$$

Im vorliegenden Experiment wird die Zahl $N_{\Delta t}(t)$ der in einem festen Zeitintervall Δt zerfallenden Kerne gemessen. Diese Zahl hängt exponentiell von der Zeit ab. Es ergibt sich

$$\ln N_{\Delta t}(t) = \ln N_0 \left(1 - e^{-\lambda \Delta t}\right) - \lambda t \quad . \tag{13}$$

Durch eine geeignete lineare Ausgleichsrechnung lassen sich dann die Zerfallskonstante sowie die Halbwertszeit bestimmen.

Bei einigen Kernen (Silber und Rhodium) ist die Lage jedoch etwas komplizierter.

Silber besteht zu 52,3% aus dem Isotop ^{107}Ag und zu 48,7% aus dem Isotop ^{109}Ag. Nach der Aktivierung laufen dann zwei unterschiedliche Zerfälle ab. Die Halbwertszeiten der beiden auftretenden Isomere ^{108}Ag und ^{110}Ag können nur bestimmt werden, da sie sehr unterschiedlich sind. Wie Abb.3 verdeutlicht, rührt die Aktivität nach einem gewissen Zeitpunkt t* praktisch nur noch von dem langlebigeren ^{108}Ag her.

Die Zerfallskurve wird in zwei Teile zerlegt, wobei zunächst eine Ausgleichsrechnung für alle t > t* durchgeführt wird, um die gesuchten Größen des langlebigen Zerfalls zu erhalten. Für den kurzlebigen Zerfall werden dann von der

$$^{51}_{23}\mathrm{V} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{52}_{23}\mathrm{V} \rightarrow {}^{52}_{24}\mathrm{Cr} + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

$$^{55}_{25}\mathrm{Mn} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{56}_{25}\mathrm{Mn} \rightarrow {}^{56}_{26}\mathrm{Fe} + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

$$^{79}_{35}\mathrm{Br} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{80}_{35}\mathrm{Br} \rightarrow {}^{80}_{36}\mathrm{Kr} + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

$$^{115}_{49}\mathrm{In} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{116}_{49}\mathrm{In} \rightarrow {}^{116}_{50}\mathrm{Sn} + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

$$^{127}_{53}\mathrm{J} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{128}_{53}\mathrm{J} \rightarrow {}^{128}_{54}\mathrm{Xe} + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

$$^{164}_{66}\mathrm{Dy} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{165}_{66}\mathrm{Dy} \rightarrow {}^{165}_{67}\mathrm{Ho} + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

$$^{107}_{47}\mathrm{Ag} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{108}_{47}\mathrm{Ag} \rightarrow {}^{108}_{48}\mathrm{Cd} + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

$$^{109}_{47}\mathrm{Ag} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{110}_{47}\mathrm{Ag} \rightarrow {}^{110}_{48}\mathrm{Cd} + \beta^- + \bar{\nu}_e$$

$$^{103}_{45}\mathrm{Rh} + \mathrm{n} \begin{cases} \xrightarrow{10\%} {}^{104\mathrm{i}}_{45}\mathrm{Rh} \rightarrow {}^{104}_{45}\mathrm{Rh} + \gamma \rightarrow {}^{104}_{46}\mathrm{Pd} + \beta^- + \bar{\nu}_e \\ \xrightarrow{90\%} {}^{104}_{45}\mathrm{Rh} \rightarrow {}^{104}_{46}\mathrm{Pd} + \beta^- + \bar{\nu}_e \end{cases}$$

Abbildung 2: Erzeugung und Zerfall einiger instabiler isotope

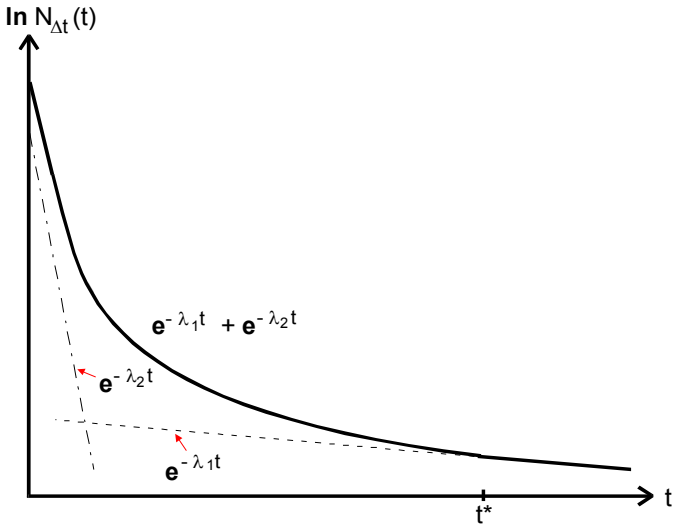


Abbildung 3: Zerfallskurve eines Präparates, das aus 2 Isotopen mit sehr unterschiedlichen Zerfallskonstanten ($\lambda_2 \ll \lambda_1$) besteht

Gesamtzählrate $N_{\Delta t}(t)$ die Werte $N_{\Delta t_l}(t) := N_{0_l}(1 - e1 - \lambda_l \Delta t)\, e^{-\lambda_l \Delta t}$,$t < t^*$ subtrahiert.

Rhodium besteht im Gegensatz zu Silber zwar nur aus einem Isotop $\left({}^{103}\mathrm{Rh}\right)$, dieses Zerfällt jedoch nach der Aktivierung zu 90% in ${}^{104}_{45}\mathrm{Rh}$ und zu 10% in ${}^{104i}_{45}\mathrm{Rh}$. Letzteres geht durch Emission eines γ-Quants in ${}^{104}\mathrm{Rh}$ über. Auch hier laufen also zwei Zerfälle mit unterschiedlichen Halbwertszeiten ab.

3 Durchführung und Auswertung

Für die Messung wird eine Apparatur gemäß Abb.4 verwendet. Als eigentlicher Detektor für die Zerfälle wird ein Geiger-Müller-Zählrohr eingesetzt, dass sich in einer Bleiabschimung befindet um das Messergebnis nicht zu verfälschen. Das Zählrohr sendet elektrische Impulse bei jedem registrierten Zerfall aus, die über einen Verstärker laufen und von einem elektronischen Zählwerk registriert werden. Das Zählwerk wird durch einen periodischen Zeitgeber gesteuert. Die Zahl der in einem einstellbaren Zeitintervall registrierten Impulse wird dann an einen Rechner weitergegeben. Nach dem Auslesevorgang wird das Zählwerk wieder auf null gesetzt, wobei die Dauer dieser Vorgänge, während derer ja keine Messung stattfindet, gegenüber dem Messzeitintervall vernachlässigber klein ist ($\approx 1\mu s$).

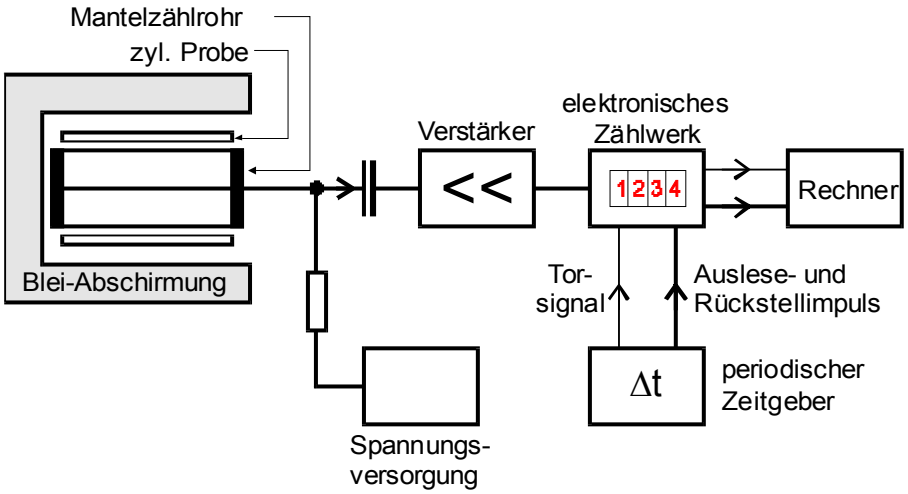


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

3.1 Nullrate

Da trotz der Abschirmung vom Zählrohr auch ohne Probe eine gewisse Anzahl von Impulsen registriert wird (verursacht durch Höhenstrahlung und natürliche Radioaktivität), wird zunächst diese Nullrate gemessen, welche später von den Messergebnissen mit Probe abgezogen werden muss.

Wir lassen die Apparatur 55 Messungen á Δt=10 Sekunden durchführen. Daraus ermittelt der Rechner die Nullrate zu (2,3 ± 0,2) pro 10 Sekunden, was vernachlässigbar gering gegenüber den (im Folgenden) gemessenen Zählraten ist.

3.2 Messreihen

Als erste Probe nehmen wir **Silber**. Es werden 50 Messungen á Δt=10 s durchgeführt, woraus der Rechner folgende Daten ermittelt:
Für den **langlebigen** Zerfall (es wurden die Messpunkte 28 bis 50 berücksichtigt):
Zerfallskonstante:

$$\lambda = (4,44 \cdot 10^{-3} \pm 2,96 \cdot 10^{-3}) \frac{1}{s}$$

Zerfallsgleichung:

$$n(t) = 28,42921 \exp(-4,436E-3 * t)$$

Halbwertszeit:

$$T = (156,2 \pm 104,0) s$$

Der Literaturwert ist 144 Sekunden.
Für den **kurzlebigen** Zerfall (es wurden die Messpunkte 3 bis 13 berücksichtigt):
Zerfallskonstante:

$$\lambda = (2,526 \cdot 10^{-2} \pm 0,153 \cdot 10^{-2}) \frac{1}{s}$$

Zerfallsgleichung:

$$n(t) = 324,468 \exp(-2,526E - 2 * t)$$

Halbwertszeit:

$$T = (27,4 \pm 1,7)s$$

Der Literaturwert ist 24,6 Sekunden.
In Abb.5 im Anhang ist die Anzahl der Zerfälle gegen die Zeit für Silber dargestellt.

Für **Rhodium** werden 60 Messungen á Δt=20 s durchgeführt. Damit ergibt sich:
Für den **langlebigen** Zerfall (es wurden die Messpunkte 35 bis 60 berücksichtigt):
Zerfallskonstante:

$$\lambda = (2,65 \cdot 10^{-3} \pm 0,79 \cdot 10^{-3}) \frac{1}{s}$$

Zerfallsgleichung:

$$n(t) = 86,33189 \exp(-2652E - 3 * t)$$

Halbwertszeit:

$$T = (261,4 \pm 78,1)s$$

Der Literaturwert ist 260,4 Sekunden.
Für den **kurzlebigen** Zerfall (es wurden die Messpunkte 3 bis 12 berücksichtigt):
Zerfallskonstante:

$$\lambda = (1,573 \cdot 10^{-2} \pm 0,043 \cdot 10^{-2}) \frac{1}{s}$$

Zerfallsgleichung:

$$n(t) = 1352,373 \exp(-1,5726 * t)$$

Halbwertszeit:

$$T = (44,1 \pm 1,2)s$$

Der Literaturwert ist 42,3 Sekunden.
In Abb.6 im Anhang ist die Anzahl der Zerfälle gegen die Zeit für Rhodium dargestellt.

Für **Vanadium** werden 25 Messungen á Δt=40 s durchgeführt. Damit ergibt sich:
Zerfallskonstante:

$$\lambda = (-3,2 \cdot 10^{-3} \pm 0,1 \cdot 10^{-3}) \frac{1}{s}$$

Halbwertszeit:

$$T = (216,7 \pm 6,8) s$$

Der Literaturwert ist 225 Sekunden.
Die anderen Daten konnten hier leider aufgrund von Problemen mit dem Rechner nicht mehr übernommen werden.

In Abb.7 im Anhang ist die Anzahl der Zerfälle gegen die Zeit für Vanadium dargestellt.

4 Anhang

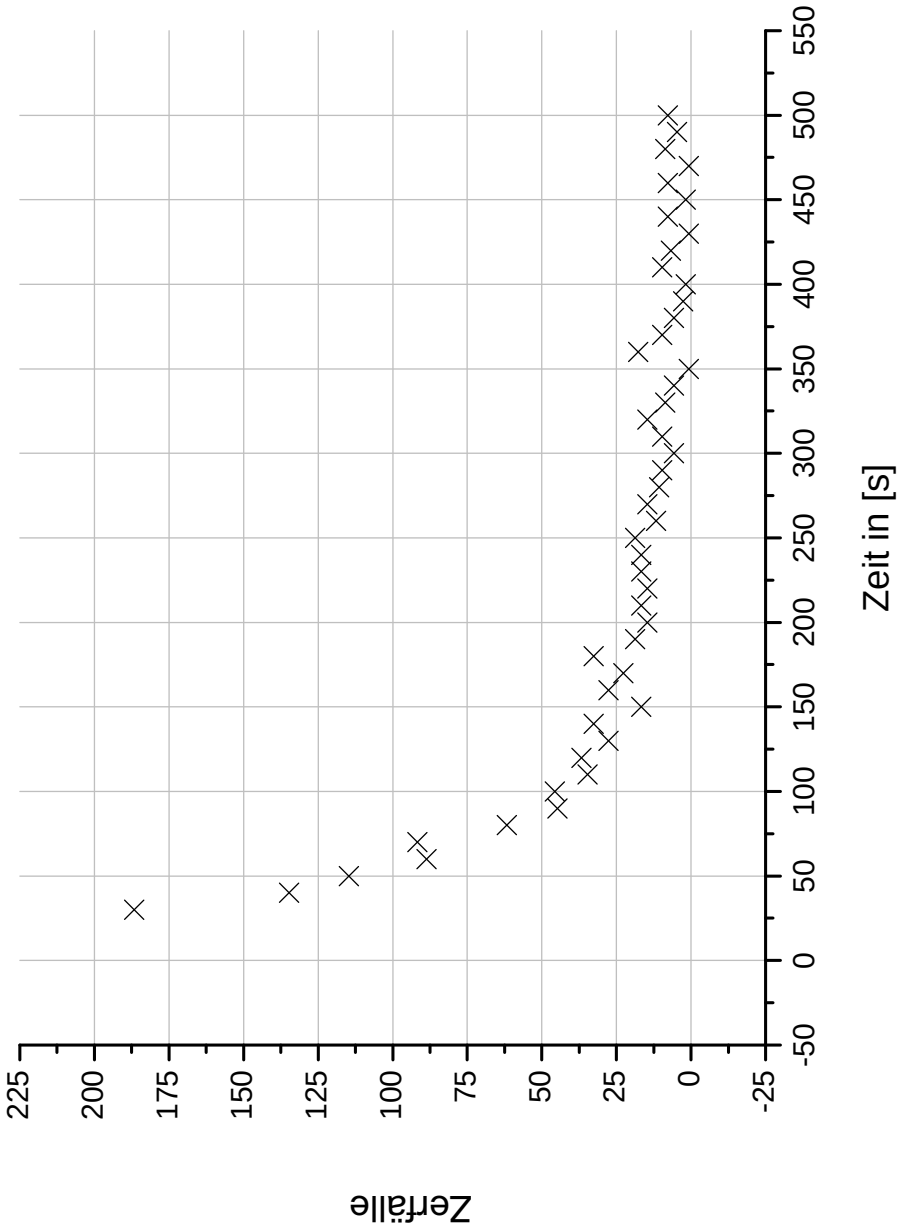


Abbildung 5: Zerfallskurve für Silber

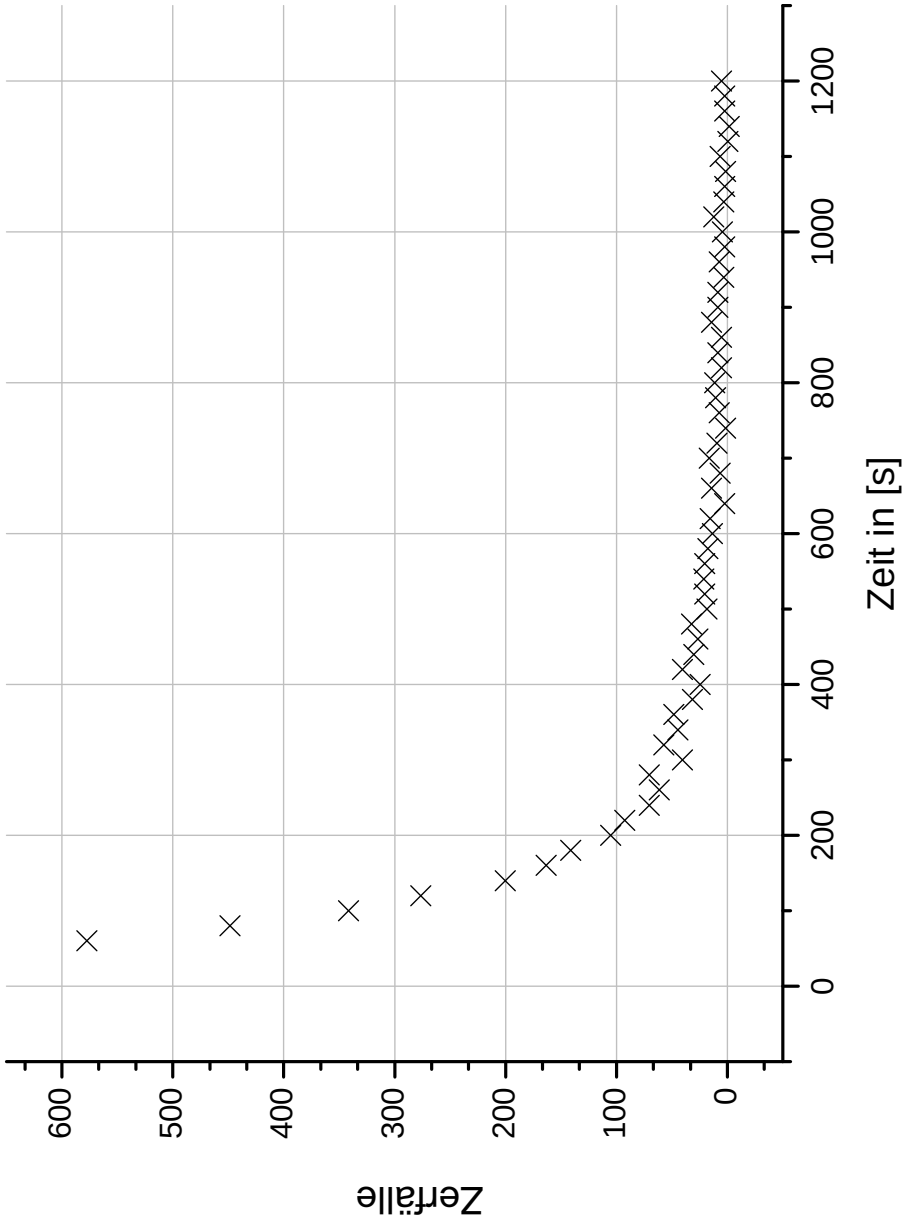


Abbildung 6: Zerfallskurve für Rhodium

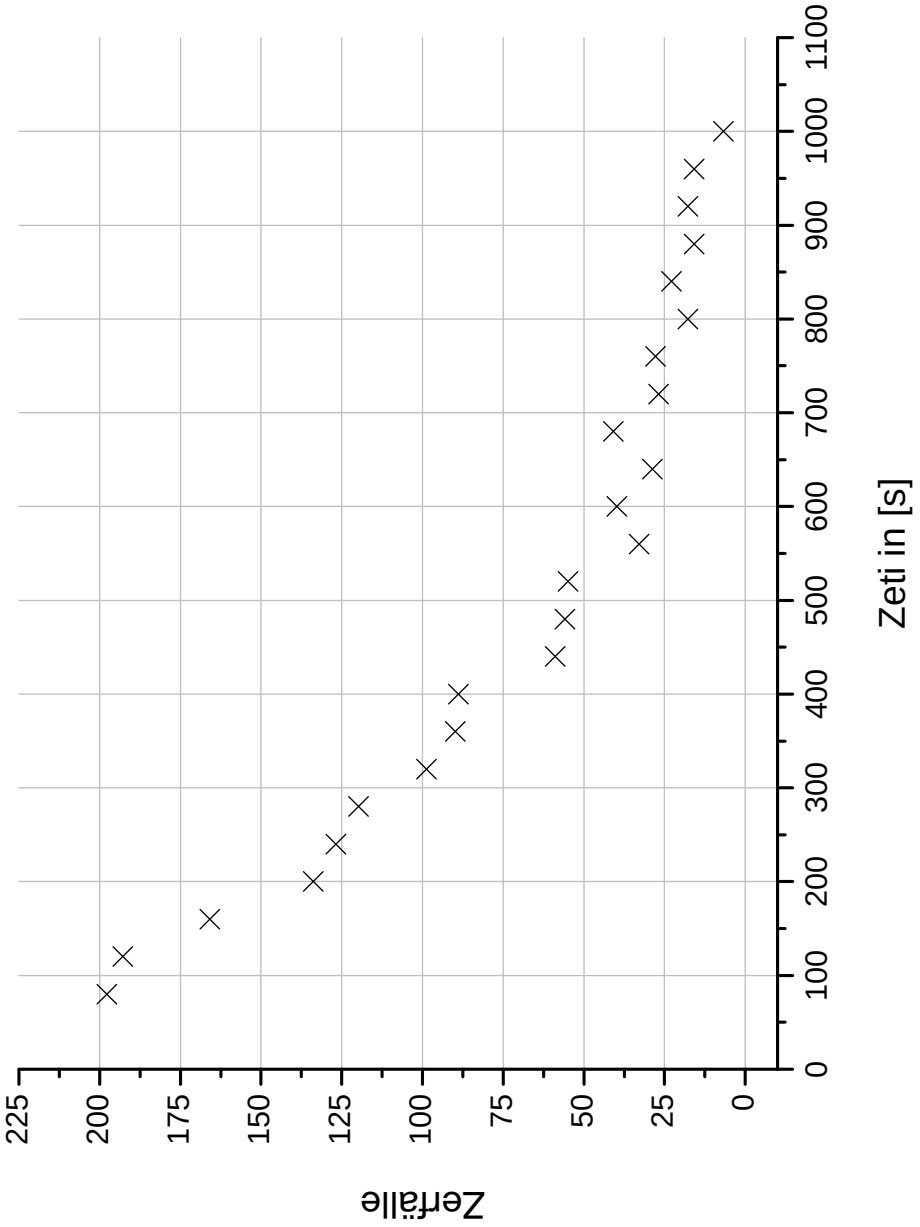


Abbildung 7: Zerfallskurve für Vanadium