

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch K2 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Halbwertszeit</b>          | Seite 1    |

## 1. Aufgabenstellung

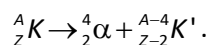
- 1.1. Die Impulszahl-Spannungs-Charakteristik eines Auslösezählrohrs ist aufzunehmen. Plateaulänge, Plateasteigung und ein geeigneter Arbeitspunkt sind anzugeben.
- 1.2. Die Halbwertszeit von Protactinium  ${}^{234}_{91}\text{Pa}_m$  ist zu ermitteln.

## 2. Grundlagen

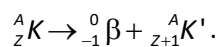
Ein Atomkern der Massenzahl  $A$  ist aus  $Z$  Protonen und  $N$  Neutronen aufgebaut ( $A=Z+N$ ). Der Zusammenhalt des Kerns ist durch die starke Bindung der einzelnen Proton-Neutron-Paare gegeben. Daher sind bei leichten Kernen diejenigen am stabilsten, deren Proton-Neutron-Verhältnis bei 1 liegt (z.B.  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ). Schwere Kerne haben eine deutlich höhere Anzahl an Protonen und die zwischen ihnen wirkende elektrostatische Abstoßung verringert die Stabilität der Kerne. Ab  $Z=84$  sind alle Kerne instabil und unterliegen dem radioaktiven Zerfall, d.h. sie wandeln sich spontan in andere Kerne um. Dabei emittieren sie Teilchen ( $\alpha$ ,  $\beta^-$  oder  $\beta^+$ ) und sehr kurzwellige  $\gamma$ -Strahlung. In vielen Fällen ist der neu entstandene Kern ebenfalls instabil und zerfällt weiter. Derartige Zerfallsreihen enden mit der Entstehung eines stabilen Kerns.

### 2.1. Arten radioaktiver Strahlung

- a)  $\alpha$ -Strahlung besteht aus Heliumkernen, die den Ausgangskern  $K$  mit hoher Energie verlassen. Bei diesem Zerfall verringert sich die Massenzahl  $A$  des Kerns um vier und die Ordnungs- bzw. Kernladungszahl  $Z$  um zwei:



- b)  $\beta^-$ -Strahlung wird emittiert, wenn ein Neutron des Kerns in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino zerfällt. Die Massenzahl bleibt dabei erhalten, nur die Ordnungszahl erhöht sich um eins:



Möglich ist aber auch ein  $\beta^+$ -Zerfall, bei dem aus einem Proton ein Positron, ein Neutron und ein Neutrino entstehen. Hierbei verringert sich die Ordnungszahl um eins.

- c) Als Folge von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfällen bleibt meist ein angeregter Tochterkern übrig, der nach charakteristischer Zeit unter Aussendung von energiereicher  $\gamma$ -Strahlung in einen weniger hoch angeregten oder den Grundzustand übergeht.

### 2.2. Zerfallsgesetz

Der radioaktive Zerfall ist kein deterministischer Prozess, sondern statistischer Natur. Die Kerne zerfallen unabhängig voneinander mit einer bestimmten Zerfallswahrscheinlichkeit. Die Zerfallswahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit ist gleich für gleichartige Kerne. Somit ist die Anzahl der Kerne, die sich in einem Zeitintervall umwandeln, proportional zur Anzahl  $N$  der vorhandenen radioaktiven Kerne:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (1)$$

|                     |                               |            |
|---------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau          | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch K2 |
| Institut für Physik | <b>Halbwertszeit</b>          | Seite 2    |

mit  $\lambda$  als isotopspezifischer Zerfallskonstante. Aus (1) ergibt sich durch Integration das radioaktive Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

wobei  $N_0$  die Zahl der noch nicht zerfallenen Kerne zum Zeitpunkt  $t=0$  ist. Die Aktivität  $A$  einer radioaktiven Substanz ist als Anzahl  $dN$  der Zerfälle pro Zeiteinheit  $dt$  definiert und wird in *Bequerel* ( $Bq$ ) angegeben.

Anstelle einer Zerfallswahrscheinlichkeit wird häufig auch die Halbwertszeit eines radioaktiven Isotops angegeben. Sie ist die Zeitspanne, nach der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen instabilen Kerne zerfallen ist. Aus (2) folgt hierfür:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (3)$$

Im vorliegenden Versuch wird die Halbwertszeit von Protactinium  $^{234}_{91}\text{Pa}_m$  bestimmt (m bezeichnet dabei einen metastabilen Kernzustand).  $^{234}_{91}\text{Pa}_m$  ist Teil der natürlichen Zerfallsreihe des  $^{238}_{92}\text{U}$  und zerfällt mit einer Halbwertszeit kleiner als 1,5 min unter Emission von  $\beta^-$ -Strahlung (vgl. Abb. 1).

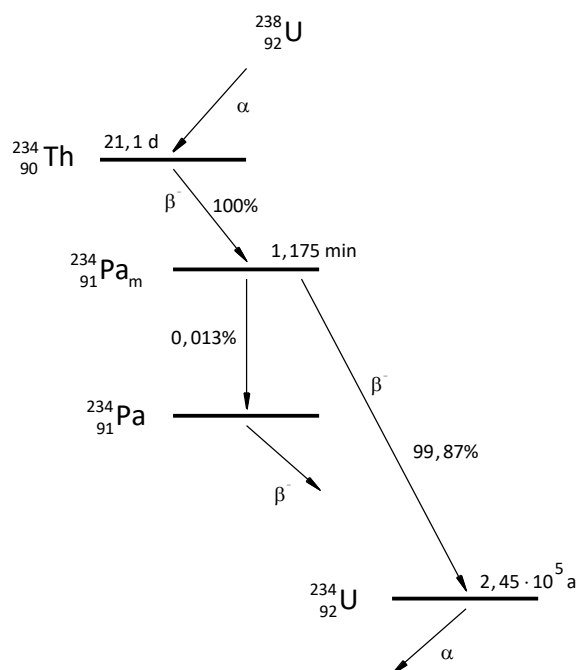


Abb. 1: Teil der U-238-Zerfallsreihe

### 2.3. Geiger-Müller-Zählrohr

Bei einfachen Zählrohren handelt es sich im Wesentlichen um einen koaxialen Kondensator, der mit einem Edelgas und Spuren eines Löschgases (z. B. Chlor, Brom) gefüllt ist. Dabei dient der Zylindermantel als Kathode und ein koaxialer, dünner Draht als Anode. Legt man nun eine Spannung  $U$  zwischen Kathode und Anode, bildet sich ein elektrisches Feld aus, dessen Stärke in Richtung Anode immer größer wird.

Radioaktive Strahlung wird im Zählrohr auf Grund ihrer ionisierenden Wirkung nachgewiesen. Während  $\gamma$ -Strahlung direkt durch den metallischen Zylindermantel dringt, ist zum Nachweis von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung an einer Stirnfläche ein dünnwandiges Eintrittsfenster nötig (Abb. 2).

$\gamma$ -Strahlung löst zunächst aus der Zylinderwand Sekundärelektronen aus, die dann einzelne oder mehrere Atome des Arbeitsgases ionisieren. Im Gegensatz dazu können  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen diese di-

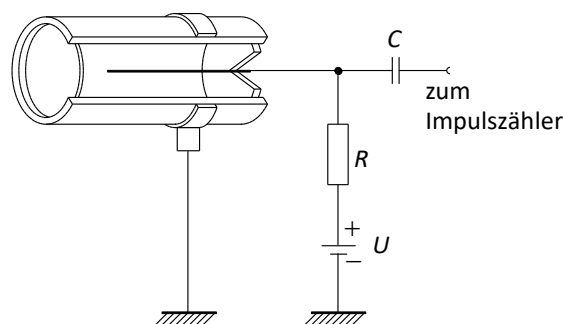


Abb. 2: Zählrohr für Betrieb als Auslösezählrohr

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch K2 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Halbwertszeit</b>          | Seite 3    |

rekt durch Stoßionisation erzeugen. Die entstandenen Ionen und Elektronen bewegen sich unter dem Einfluss des elektrischen Feldes zur Kathode bzw. Anode. Abhängig von der angelegten Spannung unterscheidet man verschiedene Betriebsarten eines Zählrohrs (mit aufsteigender Arbeitsspannung): als Ionisationskammer, als Proportionalzählrohr und, wie in diesem Versuch, als Auslösezählrohr. Wird ein Zählrohr als Ionisationskammer betrieben, erreichen alle erzeugten Elektronen die Anode. Damit ist die Amplitude eines Impulses proportional zur Energie, die die Strahlung im Zählrohr abgegeben hat. Beim Betrieb als Proportionalzählrohr werden die durch die Strahlung erzeugten Elektronen so stark beschleunigt, dass sie durch Stöße mit den Gasatomen weitere Elektronen freisetzen können. Es entstehen Elektronenlawinen. Dabei ist die Impulshöhe streng proportional zur Zahl der primär gebildeten Ionenpaare.

Beim hier verwendeten Auslösezählrohr nach Geiger und Müller bewirkt jedes einfallende ionisierende Teilchen eine so große Elektronenlawine, dass das Zählrohr kurzzeitig entladen wird. Ein entsprechender Spannungspuls kann über einen Kondensator  $C$  abgegriffen und von einem Impulszähler detektiert werden. Es wird also nicht die Impulshöhe, sondern nur die Zahl der Impulse pro Zeiteinheit registriert (Abb. 3). Diese Messgröße, die keine Information über die Art der Strahlung oder deren Energie zulässt, ist in einem bestimmten Spannungsbereich des Zählrohrs nur schwach von der angelegten Arbeitsspannung abhängig (Geiger-Müller-Plateau). Der Arbeitspunkt  $U_A$  sollte in der Mitte dieses Plateaus liegen. Plateaulänge  $U_2 - U_1$  und Plateausteigung in  $\%/100V$  stellen wichtige Gütekriterien eines Zählrohres dar.

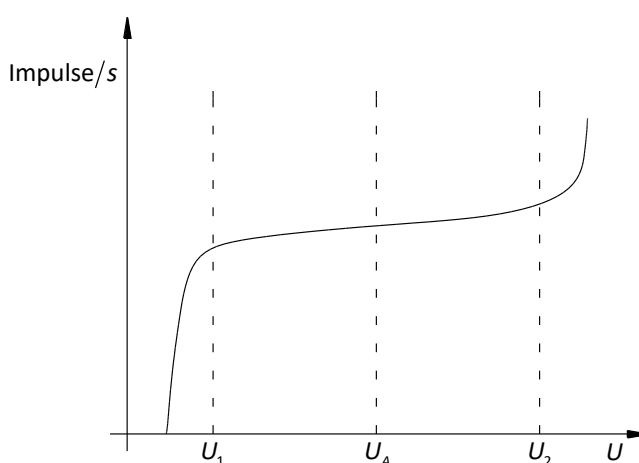


Abb. 3: Zählrohrcharakteristik

Der Arbeitspunkt  $U_A$  sollte in der Mitte dieses Plateaus liegen. Plateaulänge  $U_2 - U_1$  und Plateausteigung in  $\%/100V$  stellen wichtige Gütekriterien eines Zählrohres dar.

Wichtig für das Funktionieren des Auslösezählrohrs ist das Vorhandensein des Löschgases. Dieses hat eine niedrigere Ionisationsenergie als das Hauptgas und neutralisiert dessen Ionen schon vor Erreichen der Kathode. Treffen dann die ionisierten Löschgasatome oder -moleküle auf die Kathode, reicht ihre Energie nicht aus, um weitere Entladungen auszulösen. Die Aufgabe des Löschgases besteht demzufolge darin, dass nach dem Erlöschen der Gasentladung keine neue Zündung durch auf die Wand auftreffende Ionen erfolgt. Nach jeder Entladung ist das Zählrohr für eine gewisse Zeit (einige  $10^{-4} s$ ) unempfindlich gegenüber einfallenden geladenen Teilchen bzw. Quanten. In dieser Zeit baut sich die ursprüngliche Feldstärke an der Anode infolge der Abwanderung der positiven Ionen zur Kathode wieder auf.

### 3. Messanleitung und Auswertung

Als Präparat dient im Versuch ein sogenannter Isotopengenerator. In diesem befindet sich als radioaktive Substanz U-238 und seine Zerfallsprodukte in wässriger Lösung. Nun muss ein möglichst kurzlebige Zerfallsprodukt (hier: das Protactinium-Isotop  $Pa-234_m$ ) so von den anderen separiert werden, dass seine Halbwertszeit bestimmt werden kann. Dazu befindet sich im Isotopengenerator zusätzlich eine organische Flüssigkeit, die sich mit der wässrigen Lösung nicht mischt und sich auf Grund ihrer

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch K2 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Halbwertszeit</b>          | Seite 4    |

geringeren Dichte darüber befindet. Das beim Kernzerfall entstehende Protactinium ist in der organischen Flüssigkeit gut löslich. Schüttelt man den Isotopengenerator kräftig und durchmischt somit beide Flüssigkeiten, dann wird  $\text{Pa-234}_m$  aus der wässrigen Lösung extrahiert und steigt bei der nachfolgenden Entmischung der Flüssigkeiten zusammen mit der organischen Lösung in den oberen Teil des Generators. Das Zählrohr detektiert anfänglich eine zunehmende Radioaktivität und beim Zerfall der  $\text{Pa-234}_m$ -Kerne ein langsames Abklingen. Aus dem Verlauf der Zählrate während der zweiten Versuchsphase ist mit Hilfe geeigneter Auswerteverfahren die Bestimmung der Halbwertszeit möglich.

### 3.1. Zählrohrcharakteristik

In diesem Vorversuch ist die Abhängigkeit der Impulsrate  $n$  von der Zählrohrspannung  $U$  zu bestimmen und grafisch darzustellen. Hierzu wird ein Uranglaswürfel in die Nähe des Zählrohrfensters gestellt und mit Hilfe des Lautsprechers etwa die Schwellspannung für den Auslösebereich ermittelt. Von hier aus misst man in  $20V$ -Schritten bis  $U_{\max} = 580V$ . Als Messzeit für ein Zählintervall sind  $10s$  einzustellen und die Messung für jeden Spannungswert fünfmal durchzuführen. Da der Zähler kontinuierlich durchläuft, braucht nach Aktualisierung der Anzeige die Messung nur dann neu gestartet zu werden, wenn der Wert der Zählrohrspannung verändert wurde. Von den notierten Zählraten ist jeweils der Mittelwert zu berechnen. Aus der grafischen Darstellung  $\bar{n} = f(U)$  sind die Plateaulänge  $U_2 - U_1$  anzugeben, die Arbeitsspannung  $U_A$  festzulegen und die Plateausteigung in  $\%/100V$  zu ermitteln.

### 3.2. Bestimmung der Halbwertszeit

Vor Beginn der eigentlichen Messung ist es notwendig, den so genannten „Nulleffekt“ zu bestimmen. Dies ist die über eine längere Zeit gemittelte Zählrate, resultierend aus natürlicher Umgebungsaktivität und der Reststrahlung aus dem oberen Teil des vollständig entmischten Isotopengenerators.

Nachdem der Generator vorsichtig in seine Messposition gebracht wurde, wird am Zählgerät die Betriebsart „Impulse“ eingestellt und eine Zählung zusammen mit der Tischstoppuhr gestartet. Dabei empfiehlt sich eine Messzeit von mindestens 15 Minuten. Der gefundene Quotient aus registrierten Impulsen  $I$  und zugehöriger Messzeit  $t$  ist als Untergrundsignal später von allen zur Auswertung verwendeten Zählraten zu subtrahieren. Alternativ können auch Zwischenergebnisse  $I(t)$  notiert und später in einer Grafik dargestellt werden (*lineare Regression*, der Anstieg ist der gesuchte Nulleffekt). Für den eigentlichen Versuch wird am Zählgerät wieder die Betriebsart „Rate“ gewählt und eine Messzeit von  $10s$  eingestellt. Das Auswaschen des Protactiniums aus der Uranylнитratlösung geschieht durch kräftiges Schütteln des Isotopengenerators. Da das Experiment zur Bestimmung der Halbwertszeit mindestens fünfmal durchgeführt werden soll, ist für eine spätere korrekte Mittelung der Ergebnisse ein reproduzierbares Vorgehen nötig, beispielsweise:

- 15s Schütteln
- 30s Wartezeit für beginnende Entmischung und die Positionierung des Isotopengenerators am Messort.

Dann startet man die Messung und notiert bis zu  $t_{\max} = 500s$  die alle  $10s$  aktualisierte Zählrate. Die Mittelwerte  $\bar{n}(t)$  sind nach Subtraktion des Nulleffektes in einem Diagramm darzustellen. Es ist abzuschätzen, welche Messwerte aufgrund noch nicht vollständig erfolgter Entmischung vom exponentiell-

|                           |                               |            |
|---------------------------|-------------------------------|------------|
| TU Ilmenau                | Physikalisches Grundpraktikum | Versuch K2 |
| Institut<br>für<br>Physik | <b>Halbwertszeit</b>          | Seite 5    |

len Verlauf nach (2) abweichen und zu verwerfen sind. Bei Verwendung des Auswerteprogramms *PhysPract* liefert die Regression einer Exponentialfunktion (Asymptote nicht mit anpassen) die gesuchte Zerfallswahrscheinlichkeit  $\lambda$  einschließlich ihrer Standardunsicherheit.

In einem weiteren Diagramm sind vergleichend die normierten und logarithmierten positiven Messwerte  $\ln\left[\frac{\bar{n}(t)}{\bar{n}_0(t_0)}\right]$  als Funktion der Zeit  $t$  darzustellen.  $t_0$  ist dabei der Zeitpunkt des ersten zugelassenen Messwertes. Die erhaltene Geradensteigung  $S \equiv -\lambda$  ist mit dem schon gefundenen ersten Wert zu vergleichen. Welche Ursachen können mögliche Abweichungen der Ergebnisse haben?

Die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  von  ${}^{234}_{91}\text{Pa}_m$  ist nach Gl. (3) einschließlich ihrer Unsicherheit zu berechnen und mit dem Literaturwert zu vergleichen.

#### 4. Kontrollfragen

1. Warum sind manche Kerne instabil?
2. Was ist radioaktive Strahlung? Wie kann man sie detektieren?
3. Was versteht man unter der Halbwertszeit eines Elements?
4. Wie funktioniert der im Versuch verwendete Isotopengenerator?