

# IIA8

Modul Atom-/Kernphysik

## Halbwertszeit

Zur Bestimmung einer langen Halbwertszeit versagt die Methode der Messung des zeitlichen radioaktiven Abklingens. Deshalb wird in solchen Fällen die spezifische Aktivität gemessen. Im vorliegenden Versuch soll nun die Halbwertszeit des Kaliumisotops  $^{40}\text{K}$  aus dessen Betazerfall bestimmt werden.



## Versuch IIA8 - Halbwertszeit

Zur Bestimmung einer langen Halbwertszeit versagt die Methode der Messung des zeitlichen radioaktiven Abklingens. Deshalb wird in solchen Fällen die spezifische Aktivität gemessen. Im vorliegenden Versuch soll nun die Halbwertszeit des Kaliumisotops  $^{40}\text{K}$  aus dessen Betazerfall bestimmt werden.

## 1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Was heisst ionisierende Strahlung? Welche Arten von ionisierender Strahlung gibt es? Welche Gefahren gehen von den verschiedenen Typen der ionisierenden Strahlung aus? Wie kann man sich schützen?
- Was ist ein Isotop? Was versteht man unter der Isotopenhäufigkeit? Warum muss diese in diesem Versuch berücksichtigt werden?
- Was versteht man unter dem Begriff Halbwertszeit? Wie kann man die Halbwertszeit eines bestimmten Nuklids ändern?
- Wie kann man eine kurze, wie eine lange Halbwertszeit bestimmen?
- Wie funktioniert ein Zählrohr? Was versteht man bei einem Zählrohr unter der Ansprechempfindlichkeit?
- Was ist eine Untergrundzählrate? Warum ist es wichtig, diese zu kennen?

## 1.2 Einleitung

Als *Isotope* bezeichnet man Atomarten, deren Atomkerne gleich viele Protonen, aber unterschiedlich viele Neutronen enthalten. Alle Atomarten des gleichen Isotops haben die gleiche Ordnungszahl und stellen deshalb das selbe Element dar. Die Anzahl der Neutronen und damit auch die Massenzahlen der Isotope variieren. Chemisch verhalten sich Isotope jeweils fast identisch.

Kalium ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 19. Das bedeutet, es besitzt 19 Protonen im Atomkern. In der Erdkruste zählt Kalium zu den zehn häufigsten Elementen, es kommt in vielen Mineralien vor.

Von Kalium gibt es diverse Isotope, so ist  $^{39}\text{K}$  stabil,  $^{38}\text{K}$  hat eine Halbwertszeit von rund acht Minuten, während  $^{40}\text{K}$  eine sehr lange Halbwertszeit hat. Die Zahl vor der Bezeichnung des Elements ist die Massenzahl. So hat zum Beispiel das radioaktive  $^{40}\text{K}$  die Massenzahl 40. Die Differenz zwischen der Massenzahl und der Ordnungszahl entspricht der Anzahl der Neutronen, für  $^{40}\text{K}$  wären das 21. In der Literatur wird die Halbwertszeit von  $^{40}\text{K}$  mit  $T_{1/2} = 1.27 \cdot 10^9$  Jahren angegeben. Das ist kürzer als das Alter unseres Sonnensystems und gilt daher per Definition nicht als stabil. Dieser Versuch soll verdeutlichen, was man unter dem Begriff der Halbwertszeit versteht und die Frage klären, wie eine derart lange Halbwertszeit wie diejenige von  $^{40}\text{K}$  gemessen werden kann.

## 1.3 Theorie

### 1.3.1 Aktivität und Zerfallsgesetz

Die *Aktivität*  $A$  einer radioaktiven Stoffmenge von  $N$  Atomen ist die Anzahl der Kernzerfälle pro Zeitintervall  $t$ . Sie wird in der physikalischen Einheit Becquerel [Bq] angegeben, wobei 1 Bq einem Kernzerfall pro Sekunde entspricht. Es gilt

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} \quad (1.1)$$

Die *Zerfallskonstante*  $\lambda$  gibt dabei an, mit welcher Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall ein Atomkern zerfällt. Daher lässt sich die Aktivität  $A$  einer Stoffmenge von  $N$  Atomen zum Zeitpunkt  $t$  ausdrücken als

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) \quad (1.2)$$

Daraus folgt durch Integration von Gleichung 1.1 das Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

Hierbei sei  $N_0$  die Anzahl der Atome des Radionuklids zum Zeitpunkt  $t = 0$ . Die Aktivität ist proportional zur Anzahl der radioaktiven Atome im Präparat. Deshalb folgt die Aktivität dem gleichen Zerfallsgesetz wie  $N$ . Aus den Gleichungen 1.1 und 1.2 folgt zusammen mit  $A_0 = \lambda \cdot N_0$  direkt

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Man beachte, dass die Grösse der Aktivität einer Quelle keine direkte Aussage bezüglich deren toxischen Wirkung auf Lebewesen erlaubt. Die Strahlung aus radioaktiven Zerfällen ist je nach Art (Alphastrahlung, Betastrahlung, Gammastrahlung) und je nach kinetischer Energie unterschiedlich schädlich.

### 1.3.2 Halbwertszeit

Der radioaktive Zerfall eines gegebenen Radionuklids verläuft exponentiell, wie in Gleichung 1.3 zu sehen ist. Die *Halbwertszeit*  $T_{1/2}$  ist die Zeitspanne, in der die Menge und damit auch die Aktivität eines gegebenen Radionuklids durch den Zerfall auf die Hälfte gesunken ist. Das bedeutet

$$N(t = T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} \quad (1.4)$$

Nach Gleichung Gleichung 1.3 gilt auch

$$N(t = T_{1/2}) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \quad (1.5)$$

Setzt man die Gleichungen 1.4 und 1.5 gleich, erhält man

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

Dies kann man nach der Halbwertszeit  $T_{1/2}$  auflösen. Der Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit und der Zerfallskonstanten ist gegeben durch den Ausdruck

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (1.6)$$

Mit Gleichung 1.2 findet man damit direkt

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{A} \cdot N \quad (1.7)$$

Das bedeutet, dass während einer Halbwertszeit die Hälfte der Atomkerne sich unter Aussendung von ionisierender Strahlung in ein anderes Nuklid umwandeln. Die Halbwertszeit ist für jedes Nuklid eine feste, charakteristische Grösse, welche sich nicht beeinflussen lässt. Der exakte Zeitpunkt der Umwandlung eines einzelnen Atomkerns ist nicht vorherzusagen. Nur die Wahrscheinlichkeit einer Umwandlung pro Zeitintervall kann durch die Zerfallskonstante  $\lambda$  angegeben werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein betrachteter einzelner Kern sich innerhalb der ersten Halbwertszeit umwandelt, beträgt 50%, dass er sich innerhalb der ersten zwei Halbwertszeiten umwandelt beträgt  $50\% + 25\% = 75\%$ , und so weiter.

### 1.3.3 Partielle Halbwertszeit

Sind mehrere konkurrierende (parallele) Zerfallsarten  $k$  eines Kerns möglich mit  $k = 1, \dots, n$  und tritt die Zerfallsart  $k$  mit der Wahrscheinlichkeit  $\alpha_k$  auf, so wird die Zerfallskonstante der Zerfallsart  $k$  partielle Zerfallskonstante  $\lambda_k$  genannt. Die totale Zerfallskonstante  $\lambda$  setzt sich dann aus der Summe der partiellen Zerfallskonstanten  $\lambda_k$  wie folgt zusammen

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{k=1}^n \lambda_k \quad \text{mit} \quad \lambda_k = \alpha_k \cdot \lambda \quad (1.8)$$

Die Summe über alle möglichen Auftrittswahrscheinlichkeiten  $\alpha_k$  ist definitionsgemäss eins, also

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1$$

Ausserdem ist die partielle Halbwertszeit für *eine* einzelne Zerfallsart  $T_{1/2,k}$  analog zu Gleichung 1.6 gegeben durch

$$T_{1/2,k} = \frac{\ln(2)}{\lambda_k} \quad (1.9)$$

Aus Gleichung 1.8 und Gleichung 1.2 folgt

$$T_{1/2,k} = \frac{\ln(2)}{\alpha_k \cdot \lambda} = \frac{\ln(2) \cdot N}{\alpha_k \cdot A}$$

Mit Gleichung 1.7 ergibt dies

$$T_{1/2,k} = \frac{T_{1/2}}{\alpha_k}$$

Dies kann man umschreiben als

$$T_{1/2} = \alpha_k \cdot T_{1/2,k}$$

Setzt man Gleichung 1.9 ein, erhält man

$$T_{1/2} = \alpha_k \cdot \frac{\ln(2)}{\lambda_k} \quad (1.10)$$

Analog zu Gleichung 1.2 kann die partielle Aktivität  $A_k$ , das heisst die Anzahl Zerfälle durch die  $k$ -te Zerfallsart, gegeben werden durch

$$A_k(t) = \lambda_k \cdot N(t)$$

Damit lässt sich Gleichung 1.10 schreiben als

$$T_{1/2} = \alpha_k \cdot \frac{\ln(2)}{A_k} \cdot N \quad (1.11)$$

Um die Halbwertszeit zu bestimmen, müssen nun diverse Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. Die folgenden Unterkapitel sollen einen Überblick geben.

### 1.3.4 Raumwinkelkorrektur

Die radioaktive Quelle strahlt in alle Richtungen - also nach oben, nach unten, nach links usw. Der Detektor befindet sich in einem bestimmten Abstand oberhalb der Quelle. Er deckt damit nur einen kleinen Raumwinkel ab - nur die Strahlung, welche in Richtung des Detektors oben

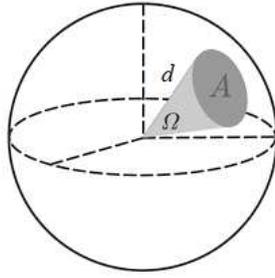


Abbildung 1.1: Man stelle sich vor, die radioaktive Quelle befindet sich in der Kugelmitte und strahle in alle Richtungen. Der Detektor befindet sich im Abstand  $d$  von der Quelle. Das Eintrittsfenster des Detektors hat eine Fläche  $A$ . Dann ist der Raumwinkel  $\Omega$  gegeben als die Mantelfläche des Kegels, in dessen Spitze sich die Quelle befindet.

abgestrahlt wird, kann auch gemessen werden. Bei der Raumwinkelkorrektur geht es darum, vom gemessenen Raumwinkel  $\Omega$  auf die gesamte Abstrahlung hochzurechnen.

Als Raumwinkel  $\Omega$  bezeichnet man den Mantel eines geraden Kreiskegels (hellgrau in Abbildung 1.1), in dessen Spitze der Mittelpunkt der Kugel liegt. Der Winkel  $\theta$  sei der halbe Öffnungswinkel in der Kegelspitze. Dann erhält man für den Raumwinkel

$$\begin{aligned} \Omega &= \int_0^{2\pi} \int_0^\theta \sin(\theta') \, d\theta' \, d\phi = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\theta \sin(\theta') \, d\theta' = 2\pi \cdot \int_0^\theta \sin(\theta') \, d\theta' \\ &= 2\pi \cdot (1 - \cos(\theta)) \end{aligned} \quad (1.12)$$

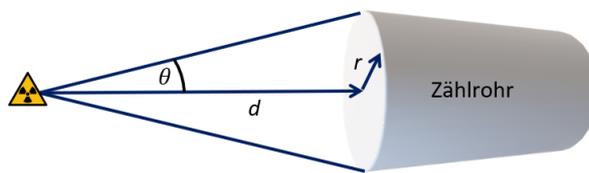


Abbildung 1.2: Das Zählrohr befindet sich im Abstand  $d$  von der Quelle, die sich in der Spitze des Kegels befindet. Der halbe Öffnungswinkel ist  $\theta$ . Das Öffnungsfenster des Zählrohrs habe einen Radius  $r$  und damit eine Eintrittsfläche  $A = \pi \cdot r^2$ .

Aus Gleichung 1.12 folgt für ein Zählrohr mit Fensterradius  $r$  und Abstand  $d$  von der Quelle mit der Annahme  $r \leq d$  sowie dem Zusammenhang

$$\cos(\theta) = \frac{\text{Ankathete}}{\text{Hypotenuse}} = \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}}$$

wobei die Hypotenuse mittels des Satzes von Pythagoras bestimmt wurde, direkt

$$\begin{aligned} \Omega &= 2\pi \cdot \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}}\right) = 2\pi \cdot \left(1 - \frac{d}{d \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{r}{d}\right)^2}}\right) = 2\pi \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d}\right)^2}}\right) \\ &\approx \pi \cdot \left(\frac{r}{d}\right)^2 \end{aligned} \quad (1.13)$$



### 1.3.7 Selbstabsorptionskorrektur

Selbstabsorption kommt bei dickeren Proben vor. Es ist möglich, dass Betateilchen von der Probe selbst abgeschirmt werden, wie in Abbildung 1.4 zu sehen ist. Der Selbstabsorptionskorrekturfaktor  $f_S$  hängt vom Probenmaterial (hier KCl) und der Dicke  $h$  der Probe ab. Er berechnet sich als

$$f_S = \frac{1}{\mu \cdot h} \quad (1.16)$$

Dabei ist  $\mu$  ein vom Material abhängiger Massenabsorptionskoeffizient. Für Betateilchen von  $^{40}\text{K}$  mit einer Energie von 1.311 MeV beträgt  $\mu = 0.0115 \text{ cm}^2/\text{mg}$ . Die Grösse  $h$  ist die Flächendicke in der Einheit  $\text{g}/\text{cm}^2$  des Kaliums in der Messschale.

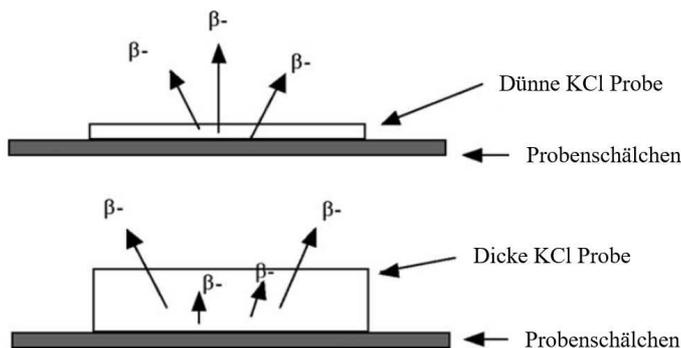


Abbildung 1.4: Oben ist eine dünne KCl Probe abgebildet, die untere KCl Probe ist dicker. Bei beiden Proben strahlen Betateilchen ab. In der dickeren Probe unten kommt es zu Selbstabsorption. Das bedeutet, dass einige Betateilchen vom darüber liegenden KCl bereits abgeschirmt werden.

### 1.3.8 Absorption zwischen Quelle und Zählrohr

Der Raum zwischen der KCl Probe und dem Zählrohr ist mit Luft gefüllt. Da die Distanz  $d$  zwischen Probe und Zählrohr sehr klein ist im Vergleich zur Reichweite der Betateilchen in Luft von mehreren Metern, kann die Absorption zwischen Quelle und Zählrohr vernachlässigt werden. Der Absorptionskorrekturfaktor ist daher  $f_A = 1$ .

Wäre die Probe weiter vom Zählrohr entfernt oder befände sich ein anderes Medium als Luft zwischen der Probe und dem Medium, dann müsste der Absorptionskorrekturfaktor  $f_A$  entsprechend abgeschätzt werden.

### 1.3.9 Gesamtkorrekturfaktor

Die Gesamtheit aller Korrekturfaktoren bezeichnet man mit  $f$ . Es gilt

$$f = f_W \cdot f_\tau \cdot f_R \cdot f_S \cdot f_A$$

Dabei ist  $f_W$  der Korrekturfaktor für den Raumwinkel,  $f_\tau$  der Korrekturfaktor für die Totzeit,  $f_R$  der Korrekturfaktor für die Rückstreuung,  $f_S$  der Korrekturfaktor für die Selbstabsorption und  $f_A$  der Korrekturfaktor für die Absorption zwischen Quelle und Zählrohr.

### 1.3.10 Detektoreffizienz

Ein Zählrohr arbeitet nicht perfekt, selbst ausserhalb der Totzeit wird nicht jedes in den Detektor eintreffende Teilchen registriert. Die Effizienz  $\varepsilon$  eines Zählrohrs hängt stark von der

Strahlungsart ab. Während für Betastrahlung eine Effizienz von rund  $\varepsilon \approx 0.99$  angenommen werden kann, liegt die Effizienz für Gammastrahlung in der Größenordnung von  $\varepsilon \approx 10^{-2}$ .

### 1.3.11 Bestimmung der Halbwertszeit

Die experimentell gemessene Zählrate  $s$  hängt mit der Aktivität  $A_k$  der Zerfallsart  $k$  über den Gesamtkorrekturfaktor  $f$  und die Detektoreffizienz  $\varepsilon$  zusammen. Es gilt die Formel

$$s = A_k \cdot f \cdot \varepsilon \quad (1.17)$$

Dabei ist  $A_k$  die  $\beta$ -Zerfallsrate,  $f$  der Gesamtkorrekturfaktor und  $\varepsilon$  die Effizienz des Detektors. Umgeformt nach  $A_k$  ergibt dies

$$A_k = \frac{s}{f \cdot \varepsilon} \quad (1.18)$$

Aus den Formeln 1.11 und 1.18 bekommt man für die Halbwertszeit schliesslich

$$T_{1/2} = \frac{\alpha_k \cdot \ln(2) \cdot N \cdot f \cdot \varepsilon}{s} \quad (1.19)$$

## 1.4 Experiment

### 1.4.1 Versuchszubehör

Für diesen Versuch wird folgendes Material benötigt:

Komponente	Anzahl
PHILIPS Zählrohr	1
Hochspannungsversorgung	1
Zählermodul	1
Kabel	3
Messschale	1
Probenhalterung	1
Schieblehre	1
Waage	1
KCl Probe	1
Gummihandschuhe	1
Rack für Module	1
Dosimeter	1
Schutzbrille	1

Das PHILIPS Zählrohr befindet sich in einer Geometrie aus Blei (siehe Abbildung 1.5). Unter dem Zählrohr befindet sich die Messkammer, welche über eine Bleitür geöffnet werden kann. Während der Messung sollte diese Bleitüre immer geschlossen sein.

### 1.4.2 Kalium

Das Zerfallsschema von  $^{40}\text{K}$  ist in Abbildung 1.6 zu sehen. Es gibt bei  $^{40}\text{K}$  drei Zerfallsarten (sogenannte Zerfallskanäle). Demnach gilt für die drei Zerfallsarten  $k = 1, \dots, n$ , dass  $n = 3$  ist. Zur Verdeutlichung bezeichne man  $\alpha_1 = \alpha_{\beta^-}$ , weiter  $\alpha_2 = \alpha_{\text{EC}}$  und  $\alpha_3 = \alpha_{\beta^+}$ . Es gilt: Der  $\beta^-$ -Zerfall hat eine Wahrscheinlichkeit von  $\alpha_{\beta^-} \approx 89\%$ , der Elektroneneinfang (EC, von englisch electron capture) hat eine Wahrscheinlichkeit von  $\alpha_{\text{EC}} \approx 11\%$ , sowie der selten auftretende



Abbildung 1.5: Für die Bestimmung der Halbwertszeit von  $^{40}\text{K}$  wird ein PHILIPS Zählrohr verwendet. Dieses ist mit Blei ummantelt. Im unteren Bereich befindet sich die Messkammer, in welche die Proben eingeführt werden können.

$\beta^+$ -Zerfall hat eine Wahrscheinlichkeit von  $\alpha_{\beta^+} \approx 0.001\%$ . Die Summe über alle Wahrscheinlichkeiten ist eins, wie in der Theorie vorausgesagt wurde:

$$\sum_{k=1}^{n=3} = \alpha_{\beta^-} + \alpha_{\text{EC}} + \alpha_{\beta^+} \approx 1$$

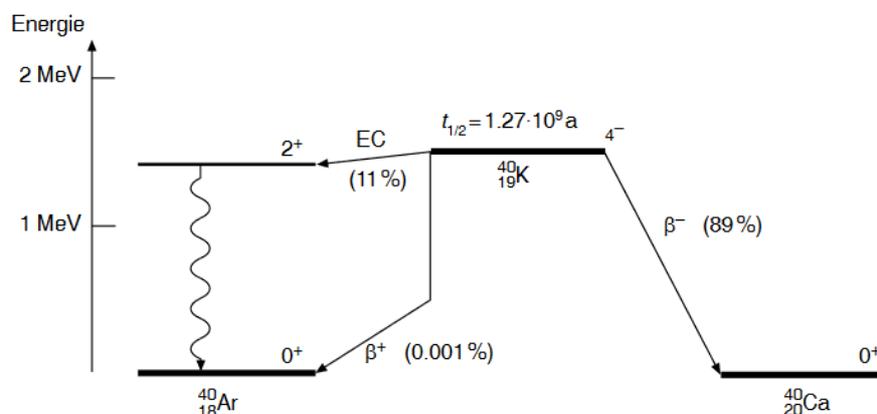


Abbildung 1.6: Bei Zerfall von  $^{40}\text{K}$  konkurrieren drei Prozesse miteinander: Der  $\beta^-$  Zerfall zu  $^{40}\text{Ca}$  ist mit 89% am wahrscheinlichsten, der Elektroneneinfang (EC, englisch 'electron capture') ist mit 11% am zweit wahrscheinlichsten und der  $\beta^+$ -Zerfall zu  $^{40}\text{Ar}$  hat eine Wahrscheinlichkeit von nur 0.001%. Der durch Elektroneneinfang entstehende angeregte Zustand von  $^{40}\text{Ar}$  zerfällt durch Photoemission in den Grundzustand.

Zur Berechnung der Anzahl Kerne  $N$  von  $^{40}\text{K}$  muss ausser der chemischen Zusammensetzung des verwendeten Kaliumsalzes KCl auch die natürliche Isotopenhäufigkeit  $\gamma$  berücksichtigt werden. Für das Radionuklid  $^{40}\text{K}$  beträgt diese

$$\gamma_{^{40}\text{K}} = 1.19 \cdot 10^{-4}$$

Das bedeutet, nur eines aus rund  $1/\gamma_{^{40}\text{K}} = 8403$  Kaliumatomen ist ein Atom des Isotops  $^{40}\text{K}$ .

### 1.4.3 Zählrohr

Ein Zählrohr ist ein beidseitig geschlossenes, zylinderförmiges Metallrohr. Dieses stellt die Kathode dar, also die negativ geladene Elektrode. Ein Draht mit einem Durchmesser von rund 0.1 mm befindet sich entlang der Zylinderachse und wird hinten (rechts in Abbildung 1.2) durch einen Isolator aus dem Zählrohr geführt. Dieser Draht stellt die Anode dar. Der Durchmesser des Zählrohres kann einige Zentimeter betragen.

Die vordere Grundseite des Zählrohres ist mit einem massearmen und daher für Beta- und Gammastrahlung durchlässigen Fenster ausgestattet. Als Material für dieses Fenster kommt zum Beispiel Glimmer in Frage. Dieses Fenster ist sehr sensibel und darf unter keinen Umständen verletzt werden.

Das Zählrohr ist mit einem Gas gefüllt. Ein Edelgas ist als Füllgas besonders vorteilhaft, weil dadurch besonders kurze Impulse erzielt werden können.

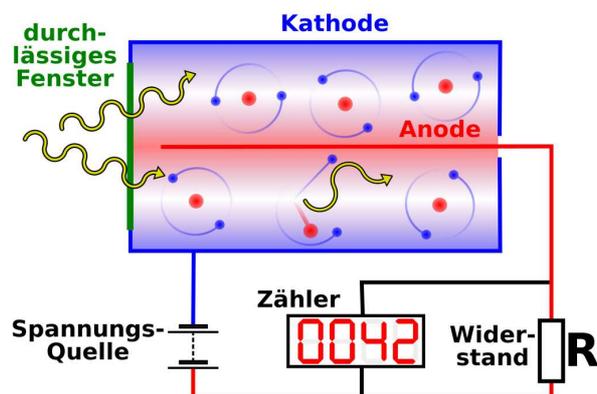


Abbildung 1.7: Das Zählrohr ist zylinderförmig. Ein Draht befindet sich auf der Zylinderachse. Eine Spannung ist zwischen dem Zylinder (Kathode) und dem Draht (Anode) angelegt. Vorne befindet sich ein durchlässiges Eintrittsfenster. Das Zählrohr ist mit Gas gefüllt. Ionisierende Strahlung löst im Zählrohr eine Elektronenlawine aus, welche zu einer Spannungsänderung zwischen Anode und Kathode führt. Diese kann über einen Widerstand gemessen und gezählt werden. Die Anzahl der so gezählten Impulse ist proportional zur Anzahl der einfallenden Teilchen.

Zwischen Anode und Kathode wird eine Gleichspannung angelegt. Wenn ionisierende Strahlung einfällt, erzeugt sie in der Gasfüllung freie Elektronen, die im elektrischen Feld zur Anode hin beschleunigt werden. Dabei werden durch Stöße mit anderen Gasatomen weitere Elektronen herausgelöst und es entstehen Elektronenlawinen mit bis zu einer Million Elektronen. Man spricht hierbei von Gasverstärkung. Über den Widerstand  $R$  kann dann eine Spannungsänderung gemessen werden. Ein Zähler zählt diese Spannungsänderungen als Impulse.

## 1.5 Hochspannung und Zähler

Das Zählrohr wird über ein Hochspannungsmodul mit einer Hochspannung von 580 V versorgt. Diese Spannung darf nicht überschritten werden! Das Hochspannungsmodul muss dazu mit dem Zählrohr über den Anschluss *GM Tube* (Geiger-Müller Zählrohr) und mit dem Zähler über den *Output* verbunden sein. Um die Hochspannung einzuschalten, ist rechts der Hauptschalter des Racks auf *ON* zu schalten und anschliessend im silbernen Modul (siehe Abbildung 1.8) unten der Schalter auf *ON* zu stellen.

Das Zählermodul ist braun und befindet sich direkt neben der Hochspannungsversorgung. Es



Abbildung 1.8: Das braune Modul links ist ein Zähler, das silberne rechts ist die Hochspannungsversorgung für das Zählrohr. Um die Hochspannung einzuschalten ist ganz rechts der Hauptschalter auf *ON* zu bringen und dann die Hochspannung unten im silbernen Modul ebenfalls auf *ON* zu stellen. Es sollte ein Wert von 580 V eingestellt sein. Das Output Signal ist mit dem Counter zu verbinden. Die Totzeit beträgt des Zählrohrs beträgt rund 190  $\mu$ s.

zeigt oben im *DISPLAY* die gemessene Anzahl Impulse an (englisch counts). Allerdings werden diese Impulse nur gezählt, während das *GATE* geöffnet ist. Dies ist am roten Lämpchen zu erkennen - leuchtet über dem Wort *GATE* kein Lämpchen, so ist das *GATE* geschlossen und der Zähler ist ausgeschaltet.

Die Dauer, wie lange dieses Gate jeweils offen sein soll, entspricht der Messdauer. Möchte man beispielsweise die Impulse während einer Minute zählen, so muss man dafür sorgen, dass das Gate während einer Minute geöffnet ist. Dies macht man im mittleren Teil des Zählers unter *TIMER*. Dort leuchten zwei Ziffern rot auf. Mit der Taste *INC M* lässt sich die linke Ziffer verändern, mit der Taste *INC N* die rechte. Die Taste ist jeweils so oft zu drücken, bis die gewünschte Ziffer eingeblendet steht. Der *DWELL* ist auf *OFF* zu belassen. Mit der Taste *TIME BASE SELECT* sollte das Lämpchen auf *0.1 SEC* gestellt werden. Für die Einstellung der gewünschten Messdauer gilt:

$$0.1 \text{ s} \cdot \text{Linke Ziffer} \cdot 10^{\text{Rechte Ziffer}}$$

Mit der Taste *RESET* wird der Timer auf null gesetzt. Anschliessend kann dieser mit der Taste *COUNT* gestartet werden. Nach Ablauf der im *TIMER* eingestellten Messdauer schliesst das *GATE* automatisch und das Ergebnis kann unter *DISPLAY* abgelesen werden. Danach ist die Taste *STOP* zu drücken und der *TIMER* mit der Taste *RESET* wieder auf null zurück zu setzen. Mit *COUNT* kann die neue Messung wieder gestartet werden, und so weiter.

**Beispiel:** In Abbildung 1.8 ist im *TIMER* die Linke Ziffer eine 6 und die rechte Ziffer eine 2.

Dann ist der Zähler eingestellt auf eine Messzeit von

$$0.1 \text{ s} \cdot 6 \cdot 10^2 = 60 \text{ s}$$

Startet man jetzt eine Messung, so bleibt das *GATE* während genau 60 Sekunden geöffnet. Anschliessend kann unter Display abgelesen werden, wie viele Impulse der Zähler während diesen 60 Sekunden erfasst hat.

## 1.6 Versuchsdurchführung

Es soll die spezifische Aktivität eines Kaliumsalzes KCl gemessen werden. Wegen der kleinen spezifischen Aktivität kann nicht mit dünnen Quellen gearbeitet werden, sondern die  $\beta$ -Zählrate  $s$  muss mit Hilfe eines unendlich dicken Präparats gemessen werden. Daraus kann schliesslich die Halbwertszeit von  $^{40}\text{K}$  bestimmt werden. Verwende einen Messplatz mit PHILIPS Zählrohr und gehe wie folgt vor:

- Schalte die Hochspannung ein. Beachte, dass für dieses Zählrohr 580 V Spannung benötigt wird. Diese Spannung sollte nicht überschritten werden. Die Hochspannung sollte 10 Minuten vor Messbeginn bereits eingeschaltet werden, um ein stabiles Messergebnis zu erhalten.
- Mach eine Untergrundmessung ohne Quelle in der Messkammer. Die Messdauer soll 10 Minuten betragen.
- Vergewissere dich, dass die leere Messschale inaktiv ist. Das kannst du machen, indem du die leere Messschale in der Messkammer platzierst und während 10 Minuten misst. Du solltest bei dieser Messung eine der Untergrundmessung ähnliche Zählrate erhalten.
- Wäge die leere Messschale auf einer möglichst exakten Waage ab. Bestimme weiter die mögliche Füllhöhe  $h$  der Messschale mit einer Schieblehre.
- Zieh dir Gummihandschuhe an. Fülle die inaktive, gewogene Messschale bis zum Rand mit KCl.



Abbildung 1.9: Kaliumchlorid wird in die inaktive Messschale bis zum Rand gefüllt. Hierfür ist ein Spatel zu verwenden. Trage Handschuhe und arbeite vorsichtig, um nichts zu verschütten. Die Messschale ist danach in einer transparenten Probenhalterung zu platzieren.

- Bestimme die Füllmenge der Messschale auf der Waage. Stelle die Messschale anschliessend in eine transparente Probenhalterung passender Grösse.

- Bestimme die Zählrate des  $^{40}\text{K}$  Präparats. Dieses soll in einer oberen Position gemäss Abbildung 1.10 platziert sein, nicht aber zuoberst. Miss dazu während 10 Minuten die Anzahl der im Zählrohr registrierten Teilchen.



Abbildung 1.10: Platziere die transparente Probehalterung mitsamt der gefüllten Messschale in einer oberen Position im Messraum. Während der Messung ist die Bleitüre des Messraums immer geschlossen zu halten.

- Miss ganz vorsichtig den Abstand  $d$  zwischen der KCl Probe und dem Eintrittsfenster des Zählrohrs sowie den Durchmesser des Zählrohrfensters. *Achtung*: Das Zählrohr darf dabei auf keinen Fall berührt werden!
- Bestimme eventuelle  $\gamma$ -Emissionen aus KCl mit einem sehr dicken Absorber aus Aluminium, den du über der KCl Probe platzierst. Die Messzeit soll wiederum 10 Minuten betragen. Der Trick dabei: Betateilchen können den Absorber nicht passieren, so dass sämtliche registrierten Ereignisse Gammastrahlen sein müssen. Da bei diesem Versuch nur die Zerfallsart der Betateilchen berücksichtigt werden soll, müssen bei der Auswertung allfällige Gammastrahlen abgezogen werden.
- Schütte das KCl aus der Messschale vorsichtig zurück in den Aufbewahrungsbehälter. Achte darauf, nichts zu verschütten. Es ist besonders wichtig, dass in der Messkammer kein KCl ausgeschüttet wird und diese sauber bleibt - Kontaminationsgefahr!
- Reinige den Arbeitsplatz sorgfältig. Benutze dafür Einwegmaterial wie Papiertücher. Wirf diese nachher in den speziell gekennzeichneten Abfalleimer für leicht aktive Abfälle.
- Der Arbeitsplatz muss frei gemessen werden.
- Zieh die Gummihandschuhe aus und wasche deine Hände gründlich.

## 1.7 Auswertung

Bearbeite folgende Aufgaben und dokumentiere deine Ergebnisse:

- Warum ist KCl wohl geeigneter als  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , um die Halbwertszeit von  $^{40}\text{K}$  zu bestimmen?

- Bestimme die Zählraten  $s$  deiner drei Messungen. Beachte, die Zählrate hat Einheit  $s^{-1}$ .
- Korrigiere die Zählrate der KCl Probe auf Untergrund und  $\gamma$ -Emission. Warum kann man anschliessend sicher sein, dass die korrigierte Zählrate nur Betateilchen berücksichtigt?  
*Tipp:* Misst man beispielsweise bei einem Untergrund von  $20 s^{-1}$  und  $\gamma$ -Emission von  $5 s^{-1}$  eine Zählrate von  $100 s^{-1}$ , dann ist die korrigierte Zählrate abzüglich Untergrund und  $\gamma$ -Emission noch  $75 s^{-1}$  für Betateilchen.
- Bestimme die Anzahl  $N$  der  $^{40}\text{K}$  Atome in deiner Messschale.  
*Tipp:* Berücksichtige dabei, dass KCl nicht nur aus Kalium besteht und beachte die Isotopenhäufigkeit von  $^{40}\text{K}$ , welche im Kapitel 1.4.2 angegeben ist. Die Avogadrozahl ist  $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , die molare Masse von Kalium sei  $M_{K-40} \approx M_{K-39} \approx 39.09 \text{ u}$ , wobei die atomare Masseneinheit  $1 \text{ u} \approx 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  entspricht. Die molare Masse von Chlor entspricht rund  $35.45 \text{ u}$ .
- Überlege dir, ob du die Näherungsformel 1.16 für die Selbstabsorptionskorrektur bei dieser Auswertung benutzen darfst und begründe deine Einschätzung.  
*Tipp:* Die Grösse  $1/(\mu \cdot \rho)$  mit dem Massenabsorptionskoeffizienten  $\mu$  und der Dichte  $\rho$  von KCl kann als charakteristische Absorptionslänge aufgefasst werden. Damit die Näherungsformel 1.16 benutzt werden darf, muss die Dicke des Präparats (in cm) viel grösser sein als die charakteristische Absorptionslänge - man spricht dann von einer unendlich dicken Probe. Ist das erfüllt?
- Bestimme die einzelnen Korrekturfaktoren und berechne daraus den Gesamtkorrekturfaktor  $f$  für die Zählrate  $s$  sowie die korrigierte Zählrate  $s_{\text{korr}} = f \cdot s$ .
- Berechne aus  $s_{\text{korr}}$  die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  für  $^{40}\text{K}$  mit der Formel 1.19.
- Schätze die systematischen Messfehler von der Zählrate  $s$ , der Distanz zwischen Zählrohr und Probe  $d$ , der Füllhöhe der Messschale  $h$  und deren Radius  $r$  ab und ermittle daraus den systematischen Fehler von  $T_{1/2}$ .
- Der Zerfall der einzelnen Atome einer strahlenden Substanz erfolgt spontan und in zeitlich unregelmässiger Weise. Der dadurch bedingte statistische Charakter der Emission von Teilchen macht sich besonders bei schwachen Präparaten beziehungsweise bei kleinen Zählraten bemerkbar und ist Poisson-verteilt. Es ergibt sich, dass bei einer gemessenen Anzahl Ereignisse  $c$  ein mittlerer statistischer Fehler  $\Delta c_{\text{stat}} = \sqrt{c}$  auftritt. Berechne den statistischen Fehler der Halbwertszeit  $T_{1/2}$ .
- Vergleiche dein Ergebnis für die Halbwertszeit von  $^{40}\text{K}$  mit dem Literaturwert in Abbildung 1.6. Stimmt dein Ergebnis innerhalb der Fehlertoleranz mit dem Literaturwert überein?

## 1.8 Literatur

Es gibt zahlreiche gute Bücher über die Kernphysik. Eine kleine Auswahl sei hier gegeben:

- B. Povh, *Kerne und Teilchen*, Springer Verlag, 2013
- H. Krieger, *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. Vieweg+Teubner Verlag, 2007

Zu den Themen Radioaktivität und Strahlenschutz finden sich diverse Unterlagen auf der Webseite des Praktikums. Es wird empfohlen, diese vorgängig gut zu studieren.