

Versuch 2: Radioaktivität

Robin Hoffmann*, Arik Bürkle†

12. Dezember 2023

Zusammenfassung

Radioaktive Strahlung ist heutzutage in vielen Bereichen des modernen Lebens vorhanden, da sie in zahlreichen Prozessen vorteilhaft genutzt wird. Daher ist es umso wichtiger, die radioaktiven Zerfälle zu verstehen, die bereits 1895 von Wilhelm Conrad Röntgen entdeckt wurden [1]. In diesem Bericht werden deshalb sowohl die verschiedenen Zerfallsprozesse als auch die Abschirmung und die Messmethoden der Strahlung behandelt.

*robin.hoffmann@student.uibk.ac.at

†arik.buerkle@student.uibk.ac.at

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Grundlagen und Theorie | 2 |
| 2.1 | Zerfallsarten | 2 |
| 2.2 | Zerfallsgesetz | 3 |
| 2.3 | Abschirmungsgesetz | 3 |
| 2.4 | Geigerzähler | 3 |
| 2.5 | Possion-Verteilung | 5 |
| 3 | Experiment und Aufbau | 5 |
| 3.1 | Messung der Geigerzähler-Charakteristik | 5 |
| 3.2 | Messung der Hintergrundstrahlung und der statistische Zerfallsprozess | 5 |
| 3.3 | Halbwertszeit von Barium 137 | 6 |
| 3.4 | Absorption von Gammastrahlung in Medien | 6 |
| 4 | Ergebnisse | 7 |
| 4.1 | Auswertung der Charakteristischen Spannungskurve | 7 |
| 4.2 | Auswertung der Hintergrundstrahlung | 8 |
| 4.3 | Auswertung Zerfallsgesetz | 9 |
| 4.4 | Auswertung Absorption von Gammastrahler | 10 |
| 5 | Diskussion und Schlussfolgerung | 11 |

1 Einleitung

Radioaktive Strahlung findet heutzutage zahlreiche Anwendungen, sei es in der Strahlentherapie von Krankheiten, bei der Diagnostik von gebrochenen Knochen durch Röntgenbilder oder bei der Energieerzeugung in Atomkraftwerken. Ohne ein fundiertes Verständnis von Radioaktivität und ihrer Messung, Schädlichkeit und Abschirmung wären viele Aspekte unseres modernen Lebens undenkbar.

In diesem Versuch beschäftigen wir uns mit der Beta-Strahlung, die ein Elektron mit Antineutrino aussendet, und der Gamma-Strahlung, die ein Photon aussendet. Die Strahlung wird dann mithilfe eines Geigerzählers gemessen, der durch die Strahlung einen kurzen Ionisationsimpuls messen kann. Wir werden uns deshalb eingehend mit den Eigenschaften des Geigerzählers und seiner charakteristischen Kurve befassen.

Darüber hinaus werden wir anhand der Hintergrundstrahlung die Eigenschaften der Poisson-Verteilung erklären. Und schließlich wird das Zerfallsgesetz durch den Zerfall von Barium 137 betrachtet, sowie die Abschirmung von Gammastrahlen durch Bleiplatten.

2 Grundlagen und Theorie

Um das durchgeführte Experiment vollständig zu verstehen, ist es wichtig zu verstehen, welche Arten von radioaktiven Zerfällen es gibt und wie sie funktionieren. Darüber hinaus ist es von Bedeutung zu wissen, wie ein Geigerzähler funktioniert, da er zur Messung der Strahlung eingesetzt wird. Aus diesen Erkenntnissen können wir sowohl das Zerfallsgesetz als auch das Abschirmungsgesetz ableiten und somit ein besseres Verständnis für die Interaktion von Strahlung mit Materie gewinnen.

2.1 Zerfallsarten

Bei radioaktiven Zerfällen wandelt sich das Ausgangsmaterial in ein energetisch günstigeres Endprodukt um, wobei dabei auch andere Teilchen freigesetzt werden. Diese Prozesse finden nur durch Quantentunneling statt, da eine bestimmte Energie erforderlich ist, um die Coulomb-Potential zu überwinden. Die Wahrscheinlichkeit, mit der diese Prozesse stattfinden, hängt von der Höhe der Potentialbarriere ab.

Beim Alpha-Zerfall wird beispielsweise ein Heliumkern (Alpha-Teilchen) aus dem Mutterkern ausgestoßen, und es bleibt ein Zerfallsprodukt zurück, das um 2 Neutronen und 2 Protonen leichter ist. Da die Masse des Tochternuklids und des Alpha-Teilchens kleiner ist als die des Ausgangsmaterials, wird nach der Relativitätstheorie Energie in Form von kinetischer Energie freigesetzt.



Beim Beta-Zerfall gibt es zwei Arten von Zerfällen: den Beta-Minus-Zerfall und den Beta-Plus-Zerfall. Beim Beta-Minus-Zerfall wandelt sich ein Neutron im Mutterkern in ein Proton um, wobei ein Elektron und ein Antineutrino freigesetzt werden. Beim Beta-Plus-Zerfall wird hingegen ein Proton in ein Neutron umgewandelt, wodurch ein Positron und ein Neutrino freigesetzt werden.

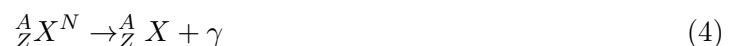
Beta-Plus-Zerfall:



Beta-Minus-Zerfall:



Beim Gamma-Zerfall befindet sich das Mutternuklid in einem angeregten Zustand und geht in einen energetisch günstigeren Zustand über. Dabei wird die nun überschüssige Energie in Form eines Photons freigesetzt.



2.2 Zerfallsgesetz

Die Anzahl der zerfallenen Teilchen hängt von der Wahrscheinlichkeit ab, mit der ein Teilchen zerfällt, und von der Anzahl der Teilchen. Dies wird durch die folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N = -A(t) \quad (5)$$

Wobei N die Anzahl der Atome angibt $A(t)$ die Aktivität und Durch Lösen dieser Differentialgleichung ergibt sich eine exponentielle Zerfallskurve mit der Zerfallskonstante λ :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Die Zerfallskonstante drückt sowohl die mittlere Lebensdauer τ als auch die Halbwertszeit $t_{1/2}$ aus:

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \quad (7)$$

2.3 Abschirmungsgesetz

Gammastrahlung kann durch verschiedene Prozesse absorbiert werden. Zum einen gibt es den Photoeffekt, bei dem das γ -Teilchen ein Atom ionisiert. Dies passiert bei Energien von etwa 50keV. Beim Compton-Effekt wird ebenfalls ein Atom ionisiert, aber diesmal behält das Photon einen Großteil seiner Energie. Dieser Prozess tritt bei Energien von etwa 100keV bis 10MeV auf. Als letztes kann es bei sehr hohen Energien zur Paarbildung kommen, jedoch sind solche Energien für diesen Versuch nicht relevant.

Da all diese Absorptionsprozesse nur mit einer gewissen statistischen Wahrscheinlichkeit stattfinden, erhält man ähnlich wie beim Zerfallsgesetz eine Exponentiale Abschirmungsfunktion:

$$I(t) = I_0 e^{-\mu d} \quad (8)$$

Dabei beschreibt μ die Absorptionswahrscheinlichkeit und I die gemessene Intensität. Aus der Absorptionswahrscheinlichkeit kann man wiederum die Halbwertsdicke bestimmen:

$$\nu = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (9)$$

2.4 Geigerzähler

Zur Detektion von radioaktiver Strahlung wurde ein neues Messgerät benötigt, das Strahlenteilchen zuverlässig erfassen kann. In diesem Zusammenhang hat sich der Geigerzähler, welcher von Hans Geiger entworfen wurde, als Instrument etabliert. Der Geigerzähler, siehe Abbildung 1 besteht im Wesentlichen aus einer Gas-Kammer, welche mit Argon gefüllt ist, sowie einer Spannungsquelle. Die Anordnung der Spannungsquelle führt dazu, dass auf der einen Seite der Kammer die Kathode und auf der anderen die Anode platziert ist. Sobald ein Strahlungsteilchen in die Gas-Kammer eindringt, ionisiert es ein Argon-Atom und gibt dabei ein Elektron frei. Das freie Elektron wird durch die angelegte Spannung beschleunigt und stößt anschließend mit ande-

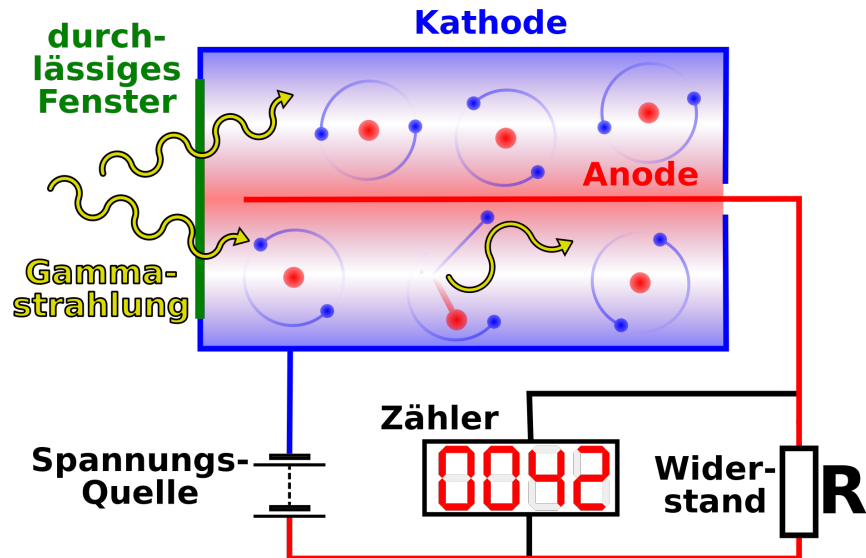


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Geigerzählers, die Funktionalität des Geigerzählers ist hierbei in Kap.2.4 beschrieben [2]

ren Argon-Atomen zusammen. Falls das Elektron bei der Kollision schnell genug ist, wird auch ein weiteres Argon-Atom ionisiert. Diese Kettenreaktion führt dazu, dass das Argon-Gas kurzzeitig ionisiert wird. Das ionisierte Gas begibt sich zur Kathode und die freien Elektronen zur Anode, wodurch der Stromkreis kurzzeitig geschlossen wird und ein kurzer Strompuls gemessen werden kann.

Die angelegte Spannung am Geigerzähler ist von Bedeutung, da sie sicherstellen muss, dass die freigesetzten Elektronen genügend Energie haben, um weitere Argon-Atome zu ionisieren, aber nicht zu hoch sein darf, dass das Argon-Gas durch die Spannung allein ionisiert wird. Damit ergibt sich eine charakteristische Kurve wie in Abbildung 2, die im ersten Teil des Versuchs gezeigt werden sollte.

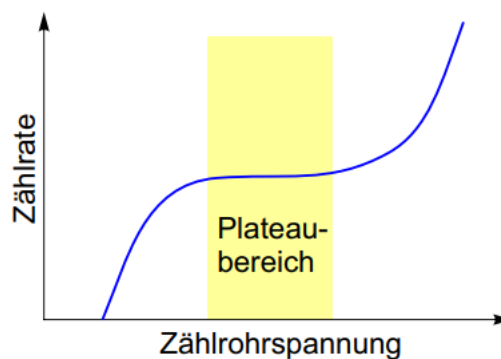


Abbildung 2: Charakteristische Kurve eines Geigerzählers mit eingezeichneten Platu.

2.5 Poisson-Verteilung

Die Poisson-Verteilung ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die häufig in der Beschreibung von radioaktiven Prozessen verwendet wird. Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Anzahl von Ereignissen in einem bestimmten Zeitraum auftritt, wenn diese Ereignisse mit einer konstanten Rate und unabhängig voneinander auftreten. Dabei ist die Varianz der Ereignisse gleich dem Erwartungswert. In der Radioaktivität kann die Poisson-Verteilung verwendet werden, um unter anderem die Anzahl der radioaktiven Zerfälle pro Zeiteinheit in einem bestimmten Material zu beschreiben. Die Poisson-Verteilung ist hierbei nützlich, um Vorhersagen über die Wahrscheinlichkeit von seltenen Ereignissen zu treffen, die aufgrund von zufälligen Prozessen auftreten können.

3 Experiment und Aufbau

In diesem Experiment werden verschiedene Strahlungsquellen mithilfe eines Geigerzählers untersucht, um unterschiedliche Eigenschaften der Radioaktivität zu demonstrieren [3].

3.1 Messung der Geigerzähler-Charakteristik

Um die Charakteristik des Geigerzählers zu bestimmen, wird eine Probe eines Beta-Strahlers unter den Geigerzähler gelegt. Dabei wird zunächst eine Startspannung von 760(5) V am Geigerzähler angelegt. Anschließend wird die Strahlung des Geigerzählers im 15-Sekunden-Modus eine Minute lang gemessen. Danach wird die Spannung um 20 V erhöht und die Messung wird erneut durchgeführt. Dies wird solange wiederholt, bis eine Spannung von 1080(5) V erreicht ist. Da der Geigerzähler die Spannungen nur in 5 V-Schritten einstellen kann, beträgt der Fehler unserer eingestellten Spannung ebenfalls 5 V. Die gemessenen Daten des Geigerzählers werden immer in Zerfälle pro Minute angegeben. Daher muss der angegebene Wert durch 4 geteilt werden, um die gemessenen Zerfälle zu erhalten. Der Fehler dieser Messung wird gemäß dem Skript [3] mit $\sigma = \sqrt{n}$ angegeben.

3.2 Messung der Hintergrundstrahlung und der statistische Zerfallsprozess

In diesem Versuch soll die Hintergrundstrahlung gemessen werden. Hierfür wird der Behälter, in dem sich später die radioaktive Probe befindet, unter den Geigerzähler gelegt. Anschließend wird am Geigerzähler eine Spannung von 930(5) V angelegt. Über einen Zeitraum von 10 Minuten wird die Aktivität alle 15 Sekunden gemessen. Dabei müssen die angegebenen Werte erneut durch 4 geteilt werden. Die Fehler der Messung entsprechen denjenigen des vorherigen Versuchs.

3.3 Halbwertszeit von Barium 137

Die angereicherte Lösung von Barium 137 wird nun unter den Geigerzähler gelegt. Das Barium befindet sich in einem angeregten Zustand und zerfällt als Gammastrahler mit einer vergleichsweise kurzen Halbwertszeit. Mithilfe des Geigerzählers kann dieser Zerfallsprozess aufgezeichnet werden. Dabei wird wieder im 15-Sekunden-Modus und bei einer Spannung von 930 V gemessen. Die Messung wird solange durchgeführt, bis nur noch das Fünffache der Hintergrundstrahlung gemessen wird. Durch die Aufzeichnung des Zerfalls kann dann die Halbwertszeit von Barium 137 bestimmt werden.

3.4 Absorption von Gammastrahlung in Medien

In diesem Versuchsteil soll die Absorptionsfähigkeit von Blei getestet werden. Dazu wird der Gammastrahler Cobalt 60 unter den Geigerzähler gelegt und die Aktivität der Probe gemessen. Der Geigerzähler führt dabei bei einer Spannung von 930(5) V drei Messungen über einen Zeitraum von einer Minute durch. Anschließend werden nach und nach mehr Bleiplatten zwischen die Quelle und den Geigerzähler gelegt, wobei die Platten unterschiedliche Dicken aufweisen:

- Platte 1 ($d = 1,70(5)$)
- Platte 2 ($d = 1,80(5)$)
- Platte 3 ($d = 1,60(5)$)
- Platte 4 ($d = 1,65(5)$)
- Platte 5 ($d = 1,60(5)$)

Durch die Messung der Aktivität mit den unterschiedlichen Bleischichten kann die Absorptionsfähigkeit von Blei für Gammastrahlung untersucht werden.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse unseres Experiments präsentiert. Dazu wurde eine charakteristische Kurve unseres Geigerzählers erstellt und die Hintergrundstrahlung in einem Histogramm dargestellt. Die Halbwertszeit und die Halbwertsdicke wurden jeweils durch eine Fitfunktion bestimmt

4.1 Auswertung der Charakteristischen Spannungskurve

Nach der Durchführung des in Abschnitt 3.1 beschriebenen Experiments konnte die Charakteristik des Geigerzählers bestimmt werden. Dazu wurden zunächst die gemessenen Daten für jede Spannung gemittelt, wobei die letzte gemessene Aktivität aufgrund von Ungenauigkeiten weggelassen wurde. Die gemittelten Daten wurden dann in einem Diagramm dargestellt, das die Charakteristik des Geigerzählers zeigt, siehe Abb.3.

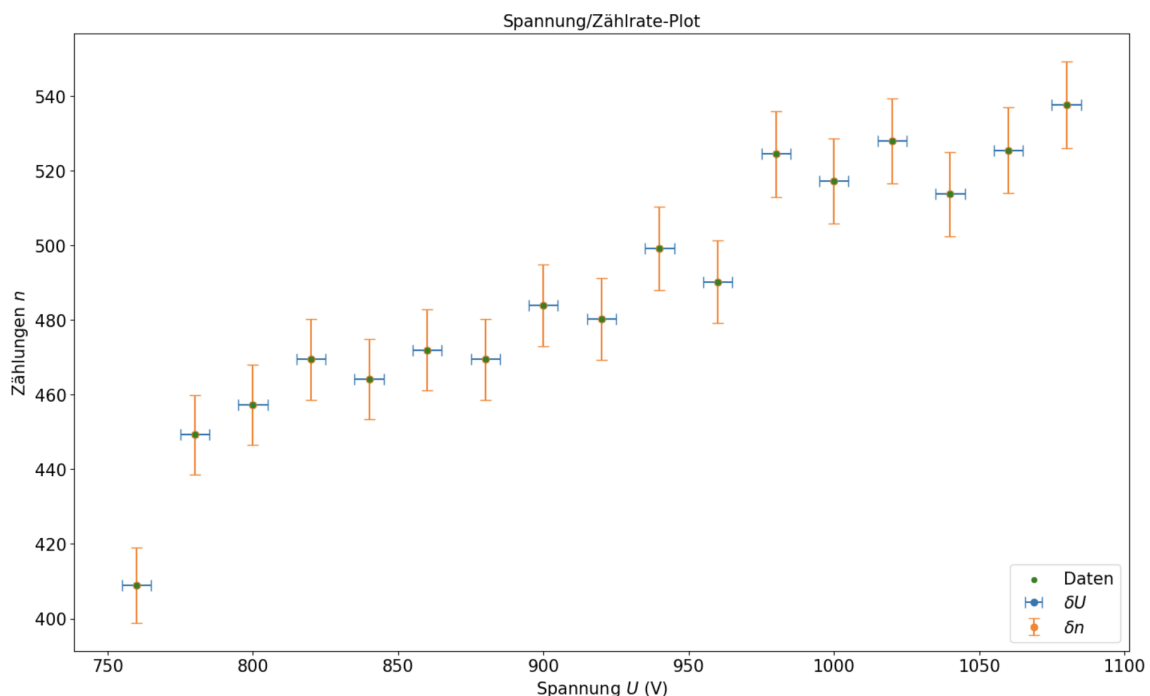


Abbildung 3: Das Diagramm zeigt die Charakteristik des Geigerzählers, bei dem die gemessene Aktivität in Abhängigkeit von der angelegten Spannung aufgetragen ist. Die Grafik zeigt, dass das Plateau bei einer Spannung von 800(20) V bis 820(20) V beginnt, da hier die Steigung zwischen den Datenpunkten abnimmt.

Nach der Auswertung der gemessenen Daten und der Erstellung des Diagramms lässt sich erkennen, dass die Kurve der Charakteristik des Geigerzählers dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen Verlauf entspricht. Es ist zu beobachten, dass der Geigerzähler bei einer Spannung zwischen 820(20) V ein Plateau aufweist. Es ist jedoch kein klares Ende des Plateaus zu erkennen da die aufzeichnung frühzeitig abgebrochen wurde. Dieses Plateau ist von Bedeutung für die weitere Durchführung des Experiments, denn bei einer Spannung von 930(5) V sollte jedes einfallende Teilchen eine Kettenreaktion auslöst. Aus diesem Grund wird bei diesem Spannungswert die Messung durchgeführt.

4.2 Auswertung der Hintergrundstrahlung

Nach der Aufnahme der Messreihe zur Hintergrundstrahlung kann ein Histogramm erstellt werden, welches darstellt, wie oft bestimmte Hintergrundstrahlungswerte gemessen werden. Aus dieser Verteilung der Messdaten lässt sich der Erwartungswert der Hintergrundstrahlung, sowie die Standardabweichung von diesem Wert bestimmen.

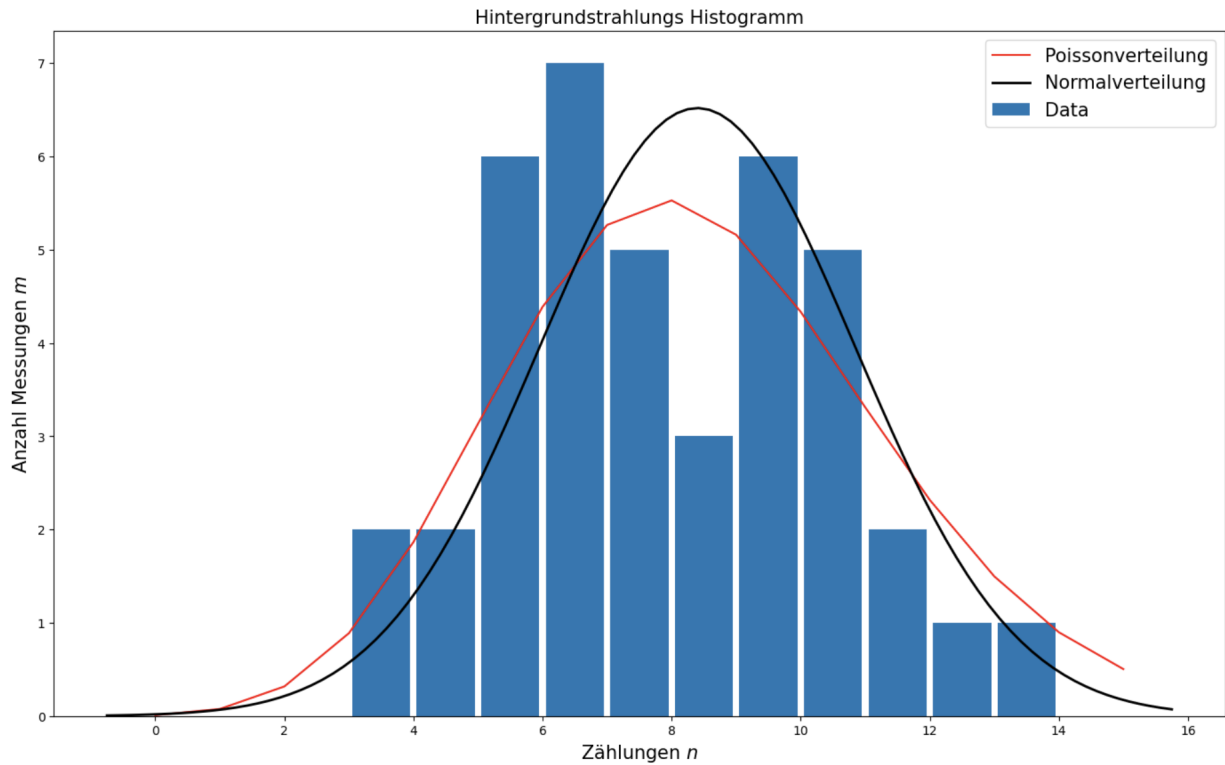


Abbildung 4: Das Diagramm zeigt unsere Messungen zur Hintergrundstrahlung, sowie eine ideale Poisson- und Normalverteilung. Es wurde mit einer Spannung U von 930(20) V gemessen. Hierbei sind die Zählungen der Zerfälle n gegen die Anzahl der Messungen m aufgetragen.

Nach der Analyse der Hintergrundstrahlung kann man feststellen, dass die Verteilung unserer gemessenen Daten nicht gut mit einer Poisson-Verteilung oder Normalverteilung beschrieben werden kann. Der Erwartungswert der Hintergrundstrahlung beträgt $\mu = 8,4$, während die Standardabweichung $\sigma = 2,5(3)$ beträgt. Im Vergleich dazu hat die Poisson-Verteilung mit dem gleichen Erwartungswert eine Standardabweichung von $\sigma = 2,89$. Der Unterschied in der Standardabweichung zeigt, dass unsere Messungen nicht vollständig zufällig sind und ein systematischer Fehler vorliegen könnte. Insbesondere gibt es im Histogramm zwei unterschiedliche Peaks, die möglicherweise durch eine andere Strahlungsquelle während der Messung verursacht wurden oder auf eine statistische Anomalie zurückzuführen sind.

Während des gemessenen Zeitintervalls wurden insgesamt 336(18) Ereignisse vom Geigerzähler erfasst. Der Fehler wurde dabei durch die Standardabweichung einer Poisson-Verteilung bestimmt.

4.3 Auswertung Zerfallsgesetz

Nach der Bereinigung der gemessenen Daten durch Subtraktion der Hintergrundaktivität erhält man eine Darstellung des exponentiellen Zerfalls der vom Barium emittierten Strahlung. Zur besseren Darstellung wird empfohlen, die bereinigten Daten logarithmisch zu plotten, um so eine Gerade zu erhalten, deren Steigung die Zerfallswahrscheinlichkeit widerspiegelt, siehe Abb.5.

Daraus ergibt sich für das Barium-137 eine Zerfallswahrscheinlichkeit von $\lambda = 0,004\,368\,5(1)\,\text{s}^{-1}$.

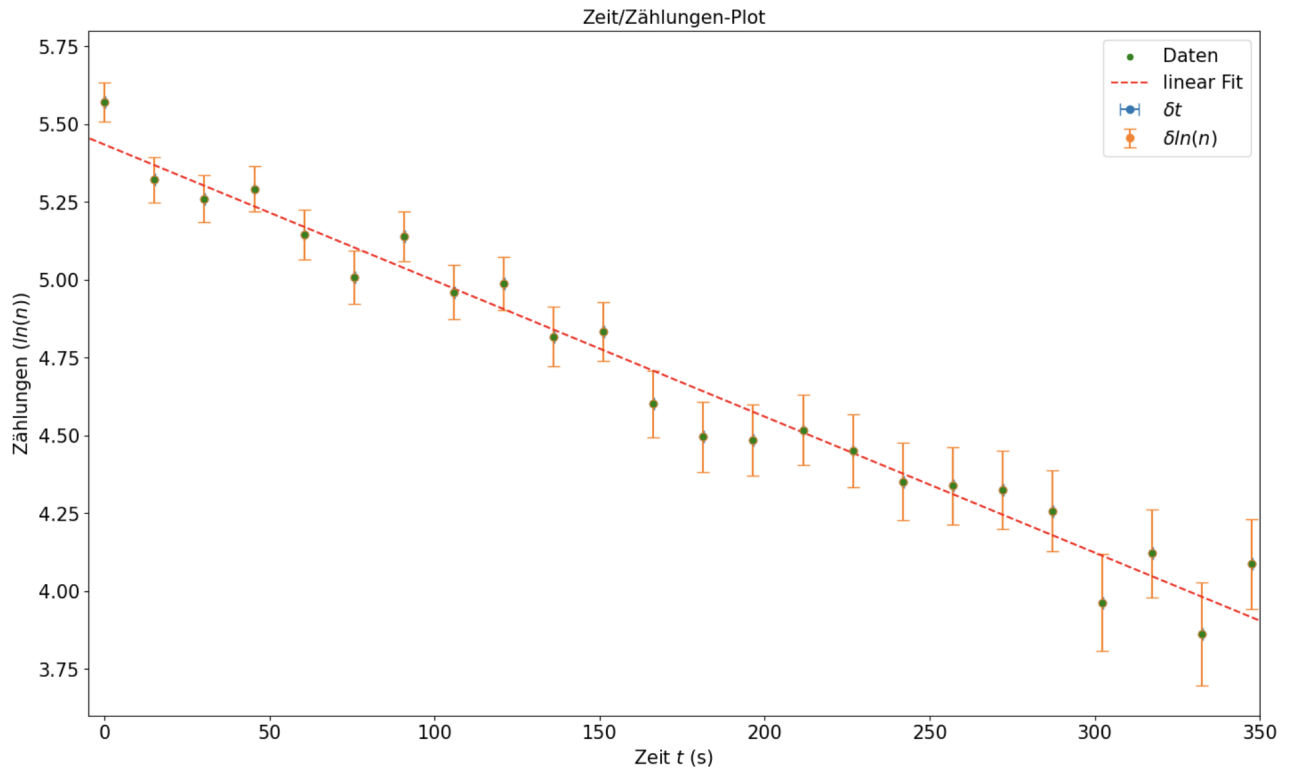


Abbildung 5: In diesem Diagramm ist die Zeit t gegen den natürlichen Logarithmus der Zählungen n aufgetragen. Außerdem wurde ein linearer Fit an die Daten mit $y = -0,004\,368\,5(1) \frac{1}{s} \cdot t + 5.4339(13)$ angelegt. Dabei entspricht die Zerfallswahrscheinlichkeit der Steigung dieses Fits.

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, kann man diese Zerfallswahrscheinlichkeit in die mittlere Lebensdauer von $t_{1/2} = 2,64(1)\,\text{min}$ umrechnen. Ein Vergleich mit dem Literaturwert der mittleren Lebensdauer von Barium-137 von $t_{1/2} = 2,55\,\text{min}$ zeigt, dass es auch hier eine gewisse Abweichung gibt, welche sich durch das lange Zeitintervall bei der Messung der Aktivität erklären lässt.

4.4 Auswertung Absorption von Gammastrahler

Um die gemessenen Daten auswerten zu können, müssen sie zunächst bereinigt werden. Dazu wird von jeder Messung der Mittelwert berechnet, von dem die Hintergrundstrahlung abgezogen werden muss. Dies wird nach der gleichen Methode wie im vorherigen Teil 4.3 durchgeführt. Dadurch ergeben sich folgende Werte:

| Dicke Bleiplatte (mm) | Durchschnittliche bereinigte Zählrate |
|-----------------------|---------------------------------------|
| 0.0(0) | 115(12) |
| 1.70(5) | 79(12) |
| 3.50(7) | 62(11) |
| 5.10(9) | 59(11) |
| 6.75(10) | 43(11) |
| 8.35(11) | 36(11) |

Diese Werte können nun in einem logarithmischen Diagramm dargestellt werden, dessen Steigung die Absorptionswahrscheinlichkeit darstellt: Somit ist die Absorptionswahrscheinlichkeit

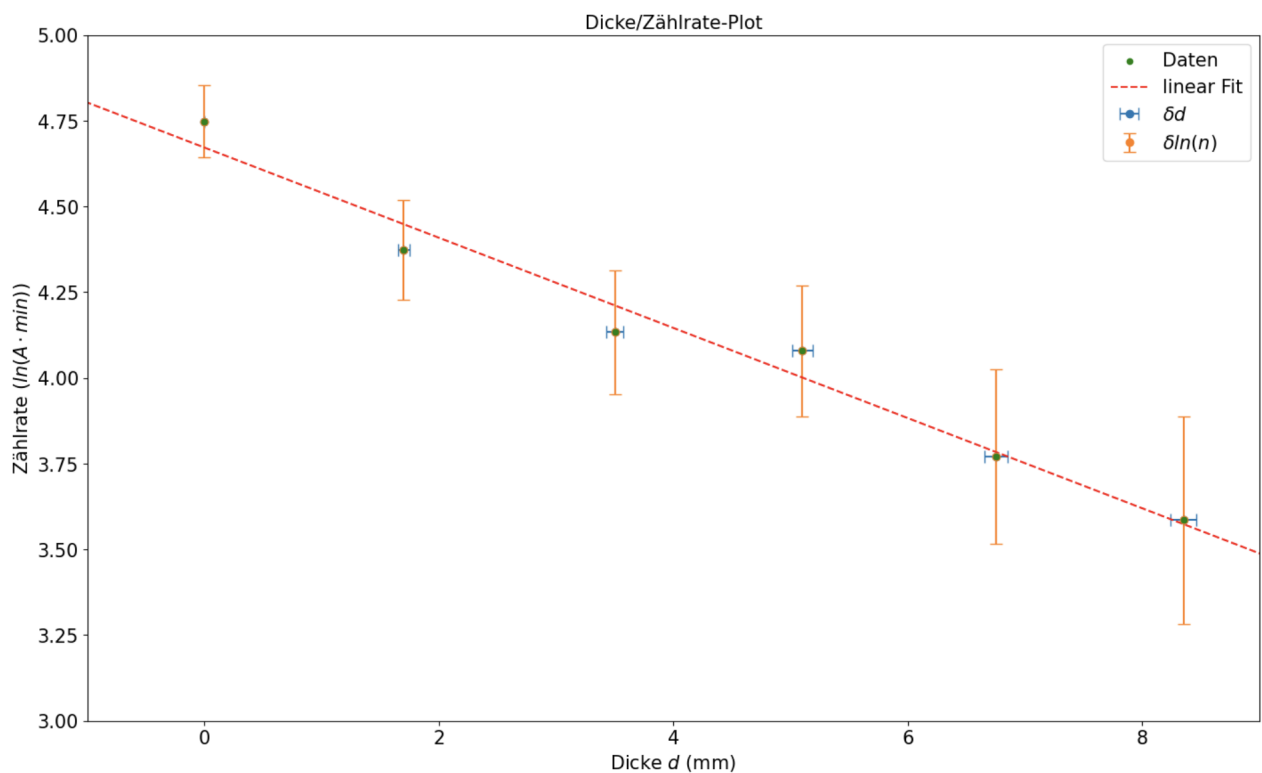


Abbildung 6: In diesem Diagramm ist die insgesamt Dicke der Bleiplatten d gegen den natürlichen Logarithmus der Zählrate aufgetragen. Außerdem wurde ein linearer Fit an die Daten mit $y = -0,1315(2) \text{ mm}^{-1} x + 4,673(3)$ angelegt.

$\mu = -0,1315(2) \text{ mm}^{-1}$ und man erhält eine Halbwerts dicke von $\nu = 5,271(5) \text{ mm}$

5 Diskussion und Schlussfolgerung

In diesem Versuch wurde zuerst die Charakteristik des Geigerzählers untersucht, indem die Spannung am Geigerzähler schrittweise erhöht und die gemessene Zerfallsrate aufgezeichnet wurde. Dabei konnte beobachtet werden, dass bei einer Spannung von etwa 820(20) V ein Plateau auftritt, dessen Ende jedoch nicht eindeutig bestimmt werden konnte.

Im zweiten Teil des Versuchs wurde die Hintergrundstrahlung im Versuchsraum auf $N = 8,4(2,5)$ bestimmt. Hierbei wurde die Strahlung des Messbechers über einen Zeitraum von 10 Minuten mit dem Geigerzähler aufgenommen. Der resultierende Datensatz sollte einer Poisson-Verteilung folgen, was jedoch nicht eindeutig erkennbar war. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte ein systematischer Fehler während der Durchführung des Experiments sein, beispielsweise durch eine nahegelegene Strahlungsquelle, die die Daten über einen längeren Zeitraum verfälscht hat.

Im dritten Teil der Versuchsreihe wurde der Zerfallsprozess von Barium-137 untersucht, indem eine angeregte Probe von Barium-137 mit dem Geigerzähler aufgenommen wurde. Hierbei ergab sich eine Halbwertszeit von $t_{1/2} = 2,64(1)$ min. Diese weicht jedoch von dem Literaturwert von $t_{1/2} = 2,55$ min ab, was erneut auf einen möglichen systematischen Fehler hinweist.

Im letzten Teil des Versuchs wurde das Absorptionsvermögen von Blei bei dem Gammastrahler Cobalt-60 untersucht, indem die Strahlungsintensität bei unterschiedlichen Bleidicken gemessen wurde. Durch diese Versuchsreihe konnte eine Halbwertsdicke von $\nu = 5,271(5)$ mm bestimmt werden, was zeigt, dass man sich durch eine mehrere Zentimeter dicke Bleischicht vor Gammastrahlung schützen kann. Allerdings gilt dies nur, solange die Strahlungsenergie nicht erhöht wird.

Literatur

- [1] Universitätsklinikum Heidelberg. *Geschichte der Radiologie*. Online; Abgerufen am 2. Mai 2023. URL: <https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/radiologische-klinik/sektion-paediatrische-radiologie/ueber-uns/geschichte-der-radiologie>.
- [2] Dirk Hünninger. *Prinzipskizze eines Zählrohrs*. Stand: 30. August 2006. Abgerufen am 2. Mai 2023.
- [3] Gregor Weihs. *Grundpraktikum 2: Radioaktivität*. Skript; Stand: 13. April 2022. Abgerufen am 2. Mai 2023.

Erklärung

Hiermit versichern wir, dass der vorliegende Bericht selbständig verfasst wurde und alle notwendigen Quellen und Referenzen angegeben sind.

.....
Student 1 Datum

.....
Student 2 Datum