

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

FORTGESCHRITTENEN PRAKTIKUM TECHNISCHE PHYSIK 1 & 2

PHY.M40 & PHY.M50

Übungstitel: Zählrohr

Betreuer: Brossmann Ulrich

Name: Wachmann Elias, Zach Andreas

Kennzahl: Gr. A2 Matrikelnummer: 12004232, 12004790

Datum: 06.12.2022 WS X SS

Inhaltsverzeichnis

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Aufgabenstellung | 3 |
| 2 Grundlagen und Voraussetzungen | 3 |
| 2.1 Geiger-Müller-Zähler | 5 |
| 2.2 Magnetspektrometer und Szintillationszähler | 6 |
| 2.3 Unsicherheitsanalyse | 7 |
| 3 Versuchsanordnung | 7 |
| 3.1 Magnetspektrometer und Geiger-Müller-Zähler | 8 |
| 3.2 Szintillationszähler | 9 |
| 4 Geräteliste | 9 |
| 5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse | 10 |
| 5.1 Qualitative Messung Alpha-, Beta-, Gammastrahlung | 10 |
| 5.2 Zählrohrcharakteristik | 11 |
| 5.3 Aufnahme einer Zählstatistik | 12 |
| 5.4 Verifizierung des Abstandsgesetz | 13 |
| 5.5 Bestimmung der Endpunktenergie über Absorption in Aluminium | 14 |
| 5.6 Messung des Beta-Energiespektrums mittels Magnetspektrometer | 15 |
| 5.7 Aufnahme und Energie-Kalibrierung eines Gammaspektrums | 16 |
| 5.8 Aufnahme des Gammaspektrums von Ra-226 | 17 |
| 6 Auswertung | 17 |
| 6.1 Zählrohrcharakteristik | 17 |
| 6.2 Aufnahme einer Zählstatistik | 18 |
| 6.3 Verifizierung des Abstandsgesetz | 19 |
| 6.4 Bestimmung der Endpunktenergie über Absorption in Aluminium | 20 |
| 6.5 Messung des Beta-Energiespektrums mittels Magnetspektrometer | 22 |
| 6.6 Gammaspektrum von Ra-226 | 24 |
| 7 Diskussion | 25 |
| 8 Zusammenfassung | 27 |

1 Aufgabenstellung [1]

- A Versuche mit Geiger-Müller Zählrohr – Ablesung am Zählgerät
- Qualitative Messung der α -, β -, γ -Strahlung mit und ohne Abschirmung
 - Aufnahme der Zählrohrcharakteristik
 - Aufnahme der Zählstatistik
 - Verifizierung des Abstandsgesetzes
 - Bestimmung der Endpunktenergie über Absorption in Al
 - Messung des β -Energiespektrums mittels Magnetspektrometer
- B Messungen mit Szintillationszähler und Hard- und Softwarekombination Leybold Cassy Lab 2
- Aufnahme und Energie-Kalibrierung eines γ -Spektrums
 - Aufnahme des γ -Spektrums von ^{226}Ra

2 Grundlagen und Voraussetzungen [1]

Radioaktivität ist der Prozess, bei dem der Kern eines instabilen Atoms Energie verliert, indem er Strahlung in Form von Teilchen oder elektromagnetischen Wellen aussendet. Diese Instabilität kann durch einen Überschuss an Protonen oder Neutronen im Kern oder durch ein Ungleichgewicht in der Verteilung der Protonen und Neutronen verursacht werden.

Es gibt drei Arten von Radioaktivität: Alpha-, Beta- und Gammastrahlung. Alphastrahlung ist eine Teilchenstrahlung. Alphateilchen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen (${}_2^4\text{He}^{2+}$) und sind die größten und massivsten der drei Typen. Sie sind auch die am wenigsten durchdringenden und können von einem Blatt Papier oder einigen Zentimetern Luft aufgehalten werden. Alphastrahlung ist ebenfalls eine Teilchenstrahlung. Betateilchen sind kleiner und energiereicher und bestehen entweder aus einem Elektron oder einem Positron. Sie können weiter eindringen als Alphateilchen, können aber immer noch von einigen Zentimetern Metall aufgehalten werden. Gammastrahlen sind die energiereichsten und durchdringendsten der drei Strahlenarten und bestehen aus hochenergetischen Photonen (Wellenstrahlung). Sie können die meisten Materialien durchdringen, auch dicken Beton und Metall, und erfordern eine spezielle Abschirmung, um sie zu blockieren.

Eine Zerfallsreihe ist eine Sequenz von radioaktiven Zerfällen, die ein Element durchläuft, während es versucht, eine stabile Kernstruktur zu erreichen. Ein Beispiel für eine Zerfallsreihe ist die Zerfallsreihe von ^{226}Ra , die auch als ^{238}U -Zerfallsreihe bekannt ist. In dieser Zerfallsreihe beginnt ^{226}Ra als instabiler ^{238}U -Kern, der einen Überschuss an Neutronen hat. Um eine stabile Struktur zu erreichen, zerfällt der Kern zunächst in ^{234}Th durch die Emission von zwei Neutronen. ^{234}Th ist jedoch ebenfalls instabil und zerfällt

weiter in ^{234}Pa durch die Emission von zwei Protonen. ^{234}Pa zerfällt wiederum in ^{234}U durch die Emission von zwei Neutronen.

Dieser Prozess setzt sich fort, wobei jedes Produkt der Zerfallsreihe instabil bleibt und weiter zerfällt, bis schließlich ^{206}Pb , ein stabiler Kern, erreicht wird. Die gesamte Zerfallsreihe von ^{226}Ra umfasst also mehrere Zerfälle und die Emission von Partikeln, bis schließlich ein stabiler Kern erreicht wird. Die Art der Zerfälle, sowie die Zerfallsprodukte sind dabei in ?? dargestellt.

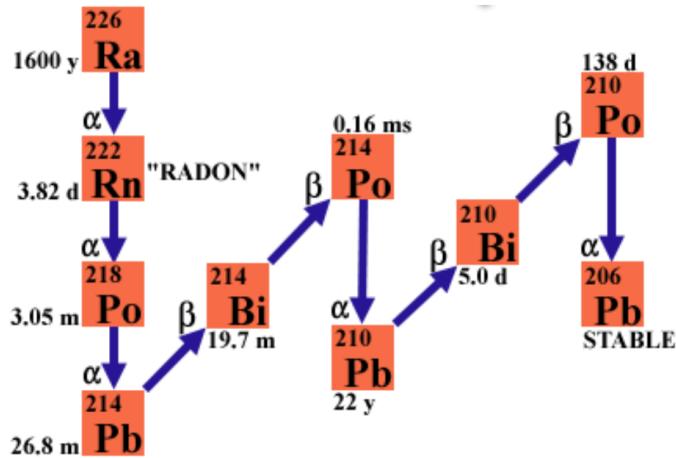


Abbildung 2.1: Zerfallsreihe von ^{226}Ra [2]

Das Abstandsgesetz beschreibt, wie die Intensität I von radioaktiver Strahlung mit dem Quadrat der Entfernung r von der Strahlungsquelle abnimmt.

$$I \propto \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

Für die Absorption radioaktiver Strahlung lässt sich das sogenannte Beer-Lambert'sche Absorptionsgesetz wie in Gleichung 2 angeben.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d} \quad (2)$$

Dabei beschreiben I_0 und I die Anfangsintensität sowie die Intensität nach einer Barriere mit Dicke d mit Absorptionskoeffizienten μ .

Bei bekanntem Absorptionskoeffizienten kann mittels der Näherung in Gleichung 3

$$\frac{\mu}{\rho} = 17,6 \cdot E_0^{-1,39} \quad (3)$$

die Endpunktenergie E_0 in MeV ermittelt werden. μ wird hierbei in cm^{-1} und ρ in g cm^{-3} eingesetzt.

Für die Ermittlung der aus dem Magnetspektrometer erhaltenen Energiewerte bietet sich ein Wechsel in natürliche Einheiten an. Man setzt – abgeleitet aus der Lorentzkraft:

$$p = eBr$$

wobei p für den Impuls, e für die Elementarladung, B für die magnetische Flussdichte und r für den Lorentz-Radius des Messgerätes steht. In natürlichen Einheiten ergibt sich dies zu:

$$p = eBr$$

da schließlich $e = 1$ gesetzt wird. So ergibt sich für die Energie E der Teilchen der Ausdruck

$$E = m_0 c^2 \left(\sqrt{\left(\frac{Br}{m_0 c} \right)^2 + 1} - 1 \right) \quad (4)$$

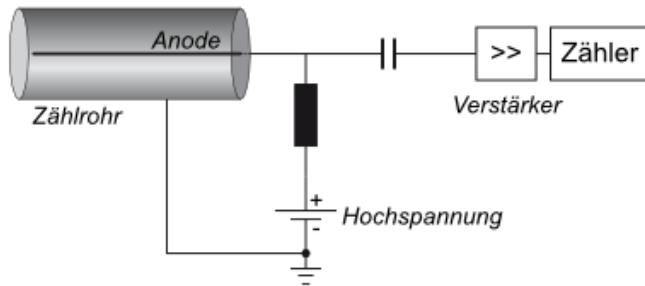
wobei m_0 die Ruhemasse des Elektrons beschreibt.

Radioaktive Stoffe werden auf vielfältige Weise eingesetzt, unter anderem in der Medizin, der Industrie und der Forschung. Radioaktive Isotope können zum Beispiel zur Diagnose und Behandlung bestimmter Krankheiten wie Krebs eingesetzt werden. In der Industrie werden sie in Rauchmeldern und als Wärmequelle für die Stromerzeugung in Kernkraftwerken eingesetzt. In der Forschung werden sie zur Untersuchung der Eigenschaften von Materialien und des Verhaltens subatomarer Teilchen eingesetzt.

Radioaktivität birgt jedoch auch gewisse Gefahren. Eine hohe Strahlenbelastung kann schwere gesundheitliche Folgen wie Strahlenkrankheit, Krebs und Tod verursachen. Daher ist es wichtig, mit radioaktivem Material vorsichtig umzugehen und die Sicherheitsprotokolle zu befolgen, um Mensch und Umwelt zu schützen.

2.1 Geiger-Müller-Zähler

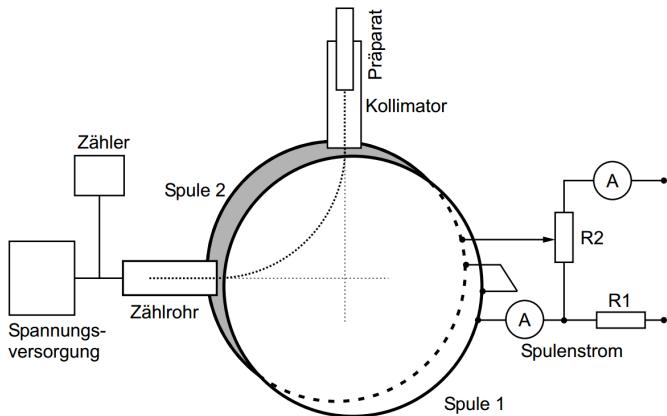
Ein Geiger-Müller-Zählrohr ist ein Gerät, das zum Messen von ionisierender Strahlung verwendet wird. Es besteht aus einem luftleeren Metallrohr, das an beiden Enden verschlossen ist und in dessen Inneren sich ein Zählgas befindet. Wenn ionisierende Strahlung in das Zählrohr eindringt, werden Elektronen aus dem Gas herausgeschlagen und durch die angelegte Spannung zwischen Anode (ein dünner Draht durch die Mitte des Rohrs) und Kathode (das Rohr selbst) in Richtung Anode beschleunigt. Durch weitere Interaktionen kommt es zu sogenannten Lawineneffekten (*Townsend-Lawine*), die schlussendlich dazu führen, dass ein einfallendes ionisierendes Teilchen weitere Elektronen löst. Die Anzahl der aufgrund der Strahlung emittierten Elektronenimpulse wird von einem Zähler gemessen. Auf diese Weise kann das Zählrohr die Intensität der ionisierenden Strahlung in der Umgebung messen. Schematisch ist ein Zählrohr in Abbildung 2.2 abgebildet.

**Abbildung 2.2:** Aufbau eines Zählrohrs

Die Zählrate des Zählrohrs hängt auch von der angelegten Spannung ab. So werden bei geringen Spannungen die Elektronen weniger stark zur Anode beschleunigt, was in einer geringeren Anzahl gezählter Impulse mündet. Erhöht man schließlich die Spannung werden die Elektronen stärker zur Anode beschleunigt und es stellt sich in einem Spannungsbereich ein Plateau an registrierten Impulsen ein. Hier kommt es aber noch zu keinen Lawineneffekten, diese treten erst bei weiterer Erhöhung der Spannung auf und gipfeln schließlich im sogenannten *Geiger-Müller-Plateau*. Dieser Bereich ist im Grunde nicht spannungsabhängig und bietet sich daher für den Betrieb ausgezeichnet an, weitere Erhöhungen der Spannung über dieses Plateau hinaus sind zwar möglich, aber nicht zielführend, da sie auf Dauer das Gerät zerstören.

2.2 Magnetspektrometer und Szintillationszähler

Um schließlich β - und γ -Strahlung getrennt messen zu können, bietet sich die Ausnutzung der Ladung der Elektronen an. So wird mittels Lorentzkraft die β -Strahlung im Magnetspektrometer in Richtung des Messgerätes abgelenkt, wohingegen die γ -Strahlung gerade weiter und somit nicht in das Messgerät propagiert. Schematisch ist ein Magnetspektrometer in Abbildung 2.3 abgebildet.

**Abbildung 2.3:** Aufbau eines Magnetspektrometers

Zur Messung von γ -Strahlung kann schließlich ein sogenannter *Szintillationszähler* verwendet werden. Das Gerät besteht im Wesentlichen aus einem photometrischen Detektor, der in der Lage ist, Lichtimpulse zu messen, die von einem szintillierenden Material ausgestrahlt werden. Wenn ionisierende Strahlung auf das szintillierende Material trifft, wird ein Teil der Strahlungsenergie in Lichtenergie umgewandelt. Dieses szintillierende Material strahlt dann kurze Lichtblitze aus, die von dem photometrischen Detektor gemessen werden. Der photometrische Detektor ist in der Regel eine Photomultiplier-Röhre, die empfindlich genug ist, um die kurzen Lichtimpulse zu messen. Die Anzahl der gemessenen Lichtimpulse wird von einem Zähler gezählt und angezeigt, sodass der Anwender die Intensität der ionisierenden Strahlung in der Umgebung bestimmen kann. Ein schematischer Aufbau eines Szintillationszählers ist in Abbildung 2.4 zu sehen.

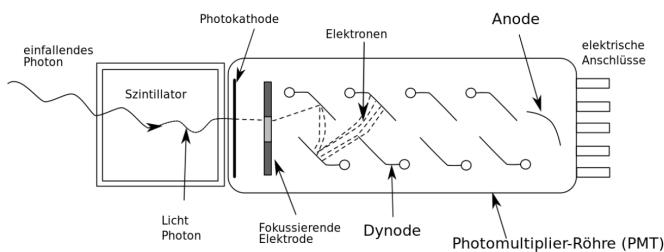


Abbildung 2.4: Aufbau eines Szintillationszählers

2.3 Unsicherheitsanalyse

Die explizit angegebenen Unsicherheiten der ermittelten Messgrößen basieren auf Berechnungen durch die Unsicherheitsangabe nach den Datenblättern der verwendeten Messgeräte. Diese sind in Tabelle 4.1 vermerkt bzw. referenziert.

Die Fehlerfortpflanzung der berechneten Werte basiert auf der Größtunsicherheitsmethode nach Gauß. Um diese Berechnungen zeiteffizient durchführen zu können, wird für jeden Unterpunkt der Laborübung ein Skript in Python implementiert. Kernstück dessen ist das package `uncertainties` [3], das intern die Fehlerfortpflanzung berechnet. Gerundet wird nach den Angaben des Skriptums der Lehrveranstaltung *Einführung in die physikalischen Messmethoden* [4].

3 Versuchsanordnung

Für die Aufgabenstellungen in A wurden zwei Aufbauten und für die Aufgabenstellungen in B ein Aufbau verwendet.

3.1 Magnetspektrometer und Geiger-Müller-Zähler

Für den ersten Teilversuch wird ein Magnetspektrometer, wie in Abbildung 3.1 abgebildet, verwendet. Es wird die radioaktive Quelle (blauer Zylinder) sowie das Zählrohr (silberner Zylinder im Vordergrund) und die Hallsonde zum Messen des *B*-Felds in die vorgesehenen Aussparungen gesteckt.

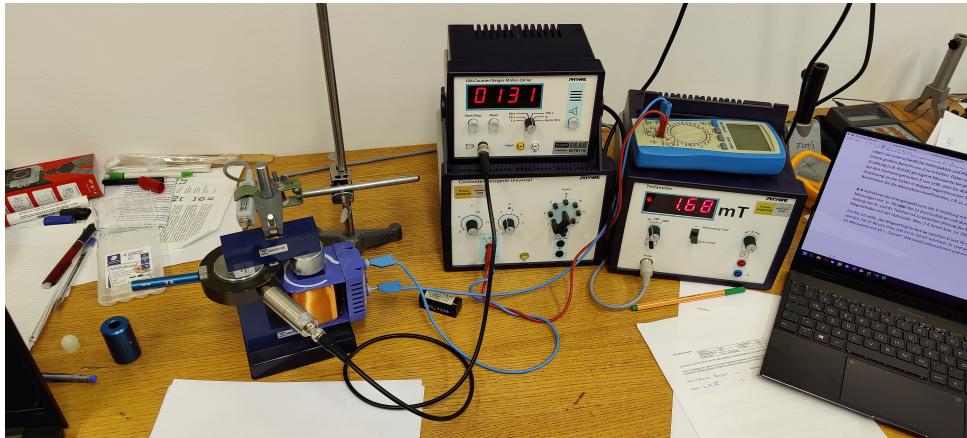


Abbildung 3.1: Aufbau des Magnetspektrometers

Der weitere Aufbau ohne Verwendung des Magnetspektrometers ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Dabei wird die Quelle (silberner Zylinder links) auf einer optischen Bank gegenüber des Zählrohrs (dunkelgrauer Zylinder rechts) platziert. Für den Absorptionsversuch wird schließlich, wie auch auf der Abbildung erkennbar, eine Dia-Halterung eingebracht, welche mit stärker oder schwächer abschirmenden Dias gefüllt werden kann.



Abbildung 3.2: Aufbau des Zählrohrs

3.2 Szintillationszähler

In Abbildung 3.3 ist der Aufbau für den Teilversuch B: Szintillationszähler ersichtlich. Als Schnittstelle zum für die Auswertung verwendeten Computer wird ein Cassy-Lab Modul (Modul mit grün/rot leuchtenden LEDs im Hintergrund) verwendet.



Abbildung 3.3: Aufbau des Szintillationszählers

4 Geräteliste

Für die Versuchsaufbauten und Auswertung wurden die in Tabelle 4.1 angegebenen Geräte und Programme verwendet.

Tabelle 4.1: Verwendete Geräte und Software sowie wichtige Materialien

| Gerätetyp | Hersteller | Typ | Inventar-Nr |
|------------------------|------------|--------------------------------------------------------|-------------|
| Digitalzähler | Leybold | 57548 | 161462 |
| GM Zählrohr S | Leybold | 5240331 | - |
| Beta-Spektrometer | Phywe | - | - |
| Netzgerät Universal | Phywe | Set Betaspektr. | - |
| Geiger-Müller Zähler | Phywe | P2523200 | 79179 |
| Spule mit Eisenkern | Phywe | - | - |
| Teslameter | Phywe | - | - |
| Hochspannungsnetzgerät | Leybold | 52188 | 161458 |
| Szintillationszähler | Leybold | 559901 | 161460 |
| Sensor-Cassy 2 | Leybold | - | 161474 |
| VKA Box | Leybold | 524058 | 161465 |
| Strahlungsquellen | - | ⁹⁰ Sr, ²²⁶ Ra, ¹³⁷ Cs | - |

5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

Im Folgenden werden die Teilversuche des Versuchsblocks A sowie B beschrieben.

5.1 Qualitative Messung Alpha-, Beta-, Gammastrahlung

Zur qualitativen Messung der unterschiedlichen Eindringtiefen von α -, β - und γ -Strahlung werden diverse Objekte unterschiedlicher Dicke und Materialzusammensetzung vor eine α -, β - und γ -strahlende ^{22}Na -Probe gehalten. Hierbei soll rein qualitativ gezeigt werden, dass die unterschiedlichen Strahlungsarten unterschiedlich leicht (oder schwierig) abzuschirmen sind, was sich in einer verringerten Aktivität gemessen hinter der Abschirmung auszeichnet. Mittels größer dimensionierter Messreihen und Differenzbildung der gemessenen Aktivitäten ließe sich der jeweilige Beitrag von α -, β - und γ -Strahlung zur Gesamtaktivität herausrechnen, hiervon wird aber bei der anschließenden rein qualitativen Analyse in Abschnitt 7 abgesehen.

Tabelle 5.1: Qualitative Messung von α -, β -, γ -Strahlung einer $^{22}_{11}\text{Na}$ -Probe unter Abschirmung folgender Materialien:

Luft, Papier, Plastiklineal mit Dicke $(1,95 \pm 0,05)$ mm, CD (inkl. CD-Case), Aluminiumplatte mit Dicke (250 ± 30) μm , Aluminiumplatte mit Dicke (800 ± 30) μm , Aluminiumplatte mit Dicke $(4,00 \pm 0,03)$ mm. Torzeit: 10 s
 A_1, A_2, A_3 : exakte Werte der Aktivität in Bq

| Material/Abschirmung / arb. Units \vee mm | A_1 / Bq | A_2 / Bq | A_3 / Bq |
|---------------------------------------------|------------|------------|------------|
| Luft | 241,1 | 230,0 | 237,4 |
| Papier | 119,5 | 125,9 | 120,8 |
| Plastiklineal | 21,7 | 17,3 | 16,8 |
| CD (inkl. CD-Case) | 8,0 | 8,4 | 10,2 |
| Aluminium 0,25 | 58,6 | 47,4 | 45,7 |
| Aluminium 0,8 | 18,6 | 14,7 | 13,2 |
| Aluminium 4,0 | 2,8 | 2,9 | 2,4 |

5.2 Zählrohrcharakteristik

Zur Aufnahme der Zählrohrcharakteristik des verwendeten Geiger-Müller-Zählrohrs wird die Betriebsspannung variiert und der Verlauf der Aktivität in Abhängigkeit von der Betriebsspannung aufgezeichnet. Als radioaktives Isotop wird ^{26}Ra gewählt, der Geiger-Müller-Zähler nimmt mit einer Torzeit von 10 s auf. Zuallererst wird die Minimalspannung eruiert indem die Spannung solange verringert wird, bis das Zählrohr keine Aktivität mehr wahrnimmt, was sich durch fehlende akustische Signale des Digitalzähler äußert. Diese Minimalspannung ergibt sich zu $U_{\min} = 316$ V, die Unsicherheit wird hierbei mit 2 V angenommen. Danach wird die Spannung zuerst sechsmal in 4-V-Schritten erhöht und abschließend 13-mal in 20-V-Schritten, wodurch eine Maximalspannung von $U_{\max} = 600$ V erreicht wurde. Pro Spannung wird die Aktivität zweimal gemessen. Der aufgenommene Aktivitätsverlauf in Abhängigkeit von der Spannung befindet sich in Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2: Aufnahme der Zählrohrcharakteristik anhand des Aktivitätsverlaufs $A(U)$ in Abhängigkeit von der Spannung U . Die Unsicherheit in der Spannung U wird dabei mit 2 V angenommen, die Aktivität A_i (Index $i \in \{1,2\}$) ist exakt.

| U / V | A_1 / Bq | A_2 / Bq |
|---------|-------------------|-------------------|
| 316 | 0 | 0 |
| 320 | 1,7 | 0,2 |
| 324 | 325 | 320,3 |
| 328 | 401,4 | 427,8 |
| 332 | 439,6 | 426,6 |
| 336 | 425,8 | 439,7 |
| 340 | 446,4 | 448,1 |
| 360 | 429,1 | 438,6 |
| 380 | 435,1 | 437,0 |
| 400 | 439,4 | 443,3 |
| 420 | 442,9 | 454,6 |
| 440 | 438,2 | 443,5 |
| 460 | 441,1 | 445,0 |
| 480 | 455,8 | 442,8 |
| 500 | 454,1 | 446,1 |
| 520 | 448,2 | 443,0 |
| 540 | 443,6 | 433,8 |
| 560 | 451,1 | 441,9 |
| 580 | 445,7 | 445,9 |
| 600 | 446,1 | 459,5 |

5.3 Aufnahme einer Zählstatistik

Von der bereits in Unterabschnitt 5.1 verwendeten ^{22}Na -Probe wird nun eine Zählstatistik aufgenommen. Gemessen wird bei einer Torzeit von 1 s über einen Gesamtzeitraum von 434 s, was ebenso viele Datenpunkte ergibt. Aufgrund der enormen Anzahl der Datenpunkte wird von einer Auflistung abgesehen und nur die Präsentation der Daten in Form eines Diagramms verfolgt. Eine grafische Darstellung der Zählstatistik findet sich in Abbildung 5.1.

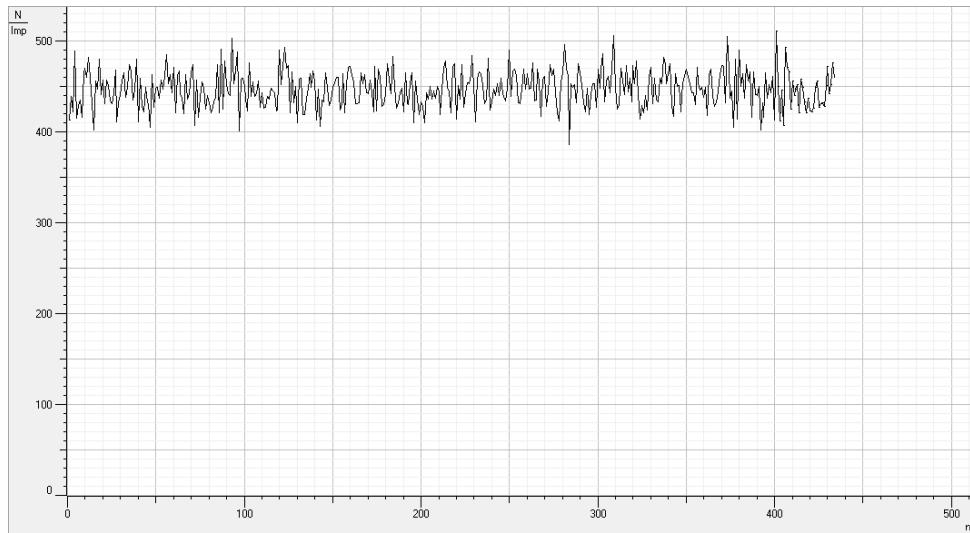


Abbildung 5.1: Grafische Darstellung der aufgenommenen Zerfälle einer ^{22}Na -Probe. Zerfälle pro Sekunde N in Bq auf der vertikalen- und Messungsnummer n auf der horizontalen Achse aufgetragen.

5.4 Verifizierung des Abstandsgesetz

Zu Verifizierung des Abstandsgesetzes aus Gleichung 1 wird die Aktivität einer ^{90}Sr -Probe in unterschiedlichen Abständen gemessen. Das zur Messung verwendete Geiger-Müller-Zählrohr wird mit einer Spannung von 480 V betrieben, gemessen wird bei einer Torzeit von 10 s. Um zumindest eine geringe statistische Aussagekraft zu erlangen, wird pro Abstand die Aktivität über die Torzeit von 10 s zweimal gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 5.3 aufgelistet.

Tabelle 5.3: Aktivitätsverlauf $A(r)$ in Abhängigkeit vom Abstand r einer ^{90}Sr -Probe bei einer Torzeit von 10 s und einer Betriebsspannung von 480 V. Für die Aktivität A_i (Index $i \in \{1,2\}$) werden exakte Werte in Bq angegeben, für die Abstände r in cm wird eine Unsicherheit von $\Delta r = 0,2$ cm angenommen.

| r / cm | A_1 / Bq | A_2 / Bq |
|----------|------------|------------|
| 1,6 | 416,6 | 423,5 |
| 2,6 | 216,4 | 218,3 |
| 3,6 | 125,2 | 121,9 |
| 5,6 | 56,7 | 55,8 |
| 7,6 | 33,9 | 36,5 |
| 9,6 | 18,4 | 23,4 |
| 11,6 | 13,3 | 16,2 |

5.5 Bestimmung der Endpunktenergie über Absorption in Aluminium

Um die Endpunktenergie bestimmen zu können, wird wiederholt die eintreffende Aktivität hinter unterschiedlichen Abschirmungen in Form von Aluminiumplatten gemessen. Dabei wird die Gesamtdicke der Aluminiumplatte variiert, indem zu Beginn tatsächlich unterschiedliche Plättchen gewählt werden und für die Realisierung höherer Dicken die dünnen Platten aufeinanderfolgend kombiniert werden.

Die unterschiedlichen Aluminiumplättchen sind in Diafilmrahmen eingespannt und werden in eine dafür passende Halterung geschoben. Gemessen wird die Aktivität einer (etwas stärkeren) ^{226}Ra -Quelle mit einem Geiger-Müller-Zählrohr unter einer Betriebsspannung von 480 V. Die Aktivität wird bei jeder Aluminiumkonfiguration dreimal gemessen. Die gemessenen Werte befinden sich in Tabelle 5.4.

Tabelle 5.4: Gemessene Aktivität A_i hinter einer Aluminiumplatte variierender Dicke d . Die Unsicherheit in der Dicke in μm wird vom Betreuer mit $\Delta d = 1\%$ abgeschätzt, die Aktivität A_i (Index $i \in \{1,2\}$) in Bq wird exakt gemessen.

| $d / \mu\text{m}$ | A_1 / Bq | A_2 / Bq | A_3 / Bq |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0 | 904,5 | 902,1 | 892,5 |
| $7,00 \pm 0,07$ | 824,8 | 804,7 | 806,6 |
| $14,00 \pm 0,14$ | 798,5 | 797,7 | 805,0 |
| $22,0 \pm 0,3$ | 691,4 | 698,5 | 692,2 |
| $28,0 \pm 0,3$ | 671,2 | 677,3 | 666,5 |
| $42,0 \pm 0,5$ | 663,1 | 659,3 | 661,5 |
| $50,0 \pm 0,5$ | 603,0 | 595,5 | 613,2 |
| $55,0 \pm 0,6$ | 602,0 | 602,1 | 604,8 |
| $85,0 \pm 0,9$ | 522,9 | 524,3 | 524,8 |
| 100 ± 1 | 477,5 | 474,5 | 478,4 |
| $110,0 \pm 1,1$ | 473,2 | 470,0 | 458,1 |
| $165,0 \pm 1,7$ | 388,1 | 379,0 | 384,9 |
| 200 ± 2 | 333,3 | 324,9 | 323,5 |
| 220 ± 3 | 319,0 | 310,1 | 317,8 |
| 345 ± 4 | 221,9 | 230,8 | 221,8 |
| 400 ± 4 | 195,8 | 187,8 | 202,8 |
| 600 ± 6 | 139,3 | 137,7 | 136,3 |
| 800 ± 8 | 97,5 | 88,8 | 95,9 |
| 1000 ± 10 | 69,3 | 72,2 | 78,8 |
| 1200 ± 12 | 62,4 | 58,2 | 56,6 |
| 1400 ± 14 | 48,7 | 49,4 | 50,9 |
| 1600 ± 16 | 43,2 | 45,6 | 40,6 |
| $(200 \pm 2) \cdot 10^1$ | 33,2 | 33,7 | 30,9 |
| $(400 \pm 4) \cdot 10^1$ | 17,5 | 18,2 | 17,5 |
| $(560 \pm 6) \cdot 10^1$ | 18,6 | 18,1 | 17,6 |

5.6 Messung des Beta-Energiespektrums mittels Magnetspektrometer

Zur Messung des Energiespektrums wird der Aufbau in Unterabschnitt 5.6 realisiert. Als Nuklid wird ein ^{22}Na verwendet und bei einem Magnetfeld von ca. 5 mT mit einer Torzeit von 100 s zu messen begonnen. Damit schließlich auch die β -Strahlung beim Messgerät

angelangt, ist hierbei auf die richtige Polung der Spulenkontakte zu achten, sodass die Lorentzkraft die Teilchen in die gewünschte Richtung ablenkt. Um externe Einflüsse auszuschließen wird ebenfalls die Hintergrundstrahlung im Raum aufgezeichnet, diese ergibt sich bei gleicher Torzeit zu 19 Zerfällen, welche von den Messwerten abgezogen werden. In Tabelle 5.5 sind die erhaltenen Messwerte der beiden Messungen aufgelistet.

Tabelle 5.5: Zerfälle bei Messung des β -Energiespektrums von ^{22}Na mittels Magnetspektrometer. Mit B der Stärke des Magnetfelds des Magnetspektrometers in mT mit $\Delta B = 0,2 \text{ mT}$ und A_1 bzw. A_2 der Anzahl der erhaltenen Zerfälle in cBq. Werte inklusive Hintergrundstrahlung von 19 cBq!

| B / mT | A_1 / cBq | A_2 / cBq |
|-----------------|--------------------|--------------------|
| 4 | 131 | 140 |
| 9,7 | 174 | 188 |
| 15,8 | 259 | 225 |
| 19,9 | 278 | 275 |
| 25,0 | 311 | 312 |
| 30,8 | 363 | 372 |
| 35,5 | 381 | 347 |
| 40,1 | 344 | 343 |
| 45,1 | 306 | 306 |
| 50,1 | 272 | 270 |
| 55,5 | 237 | 238 |
| 60,0 | 198 | 198 |
| 66,5 | 171 | 158 |

5.7 Aufnahme und Energie-Kalibrierung eines Gammaspektrums

Um in Unterabschnitt 5.8 das Gammaspektrum von ^{226}Ra analysieren zu können, wird zuerst ein Referenzspektrum anhand des Isotops ^{137}Cs aufgenommen. Die Maxima im Spektrum von ^{137}Cs sind genau tabelliert, weswegen dieses Spektrum als Referenzspektrum zur Kalibrierung herangezogen werden kann. Gemessen wird von der Software **Leybold Cassy Lab 2** und einem dazu kompatiblen Szintillationszähler. Dieser wird mit einer Spannung von $U = 730 \text{ V}$ (Unsicherheit implizit) betrieben. Der Szintillationszähler zählt über einen Zeitraum von $\Delta t = 45 \text{ min}$. Mit den erhaltenen Daten kann in Unterabschnitt 6.6 gearbeitet werden.

5.8 Aufnahme des Gammaspektrums von Ra-226

Da nun in Unterabschnitt 5.7 ein Referenzspektrum anhand von ^{137}Cs ermittelt wurde, wird nun die Probe von Interesse – ^{226}Ra – vermessen. Es gelten dieselben Bedingungen wie in Unterabschnitt 5.7. Ein Diagramm der vom Computer gemessenen Daten befindet sich in Abbildung 6.7.

6 Auswertung

Die Auswertung der Daten wird computergestützt in `python` vorgenommen. Dabei kommt neben den in Unterabschnitt 2.3 erwähnten packages auch das `labtool-ex2` package zum Erstellen der Fits zum Einsatz.

6.1 Zählrohrcharakteristik

Die Zählraten aus Tabelle 5.2 werden nun in Abbildung 6.1 in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen. Dabei ist die jeweilige Zählrate das Mittel der beiden Ergebnisse A_1 und A_2 aus Tabelle 5.2.

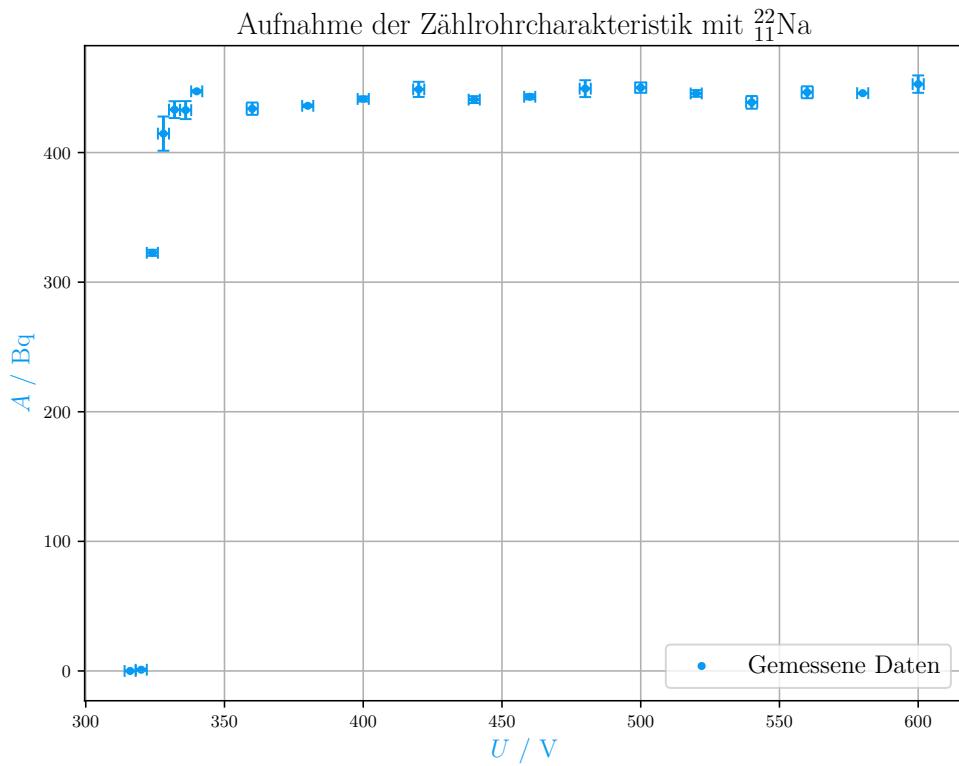


Abbildung 6.1: Gemittelte Zählraten A in Bq in Abhängigkeit von der Spannung U in V zwischen Zählrohr-Anode und -Kathode.

6.2 Aufnahme einer Zählstatistik

Die Aufnahme einer statistischen Verteilung der Zerfälle der ^{22}Na -Probe, wie in Unterabschnitt 5.3, lässt sich wie in Abbildung 6.2 mittels eines Histogramms darstellen.

Um bestätigen oder widerlegen zu können, ob sich die Zerfälle wie erwartet durch eine Normalverteilung approximieren lassen, werden die gemessenen Werte auf die Sample-Size von $N = 450$ normiert. Dadurch ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für den vorliegenden Versuch. Schließlich werden statistische Schätzer für den Mittelwert μ und die Standardabweichung σ errechnet und eine Normalverteilung mit diesen Schätzern (in Abbildung 6.2 in orange) eingezeichnet.

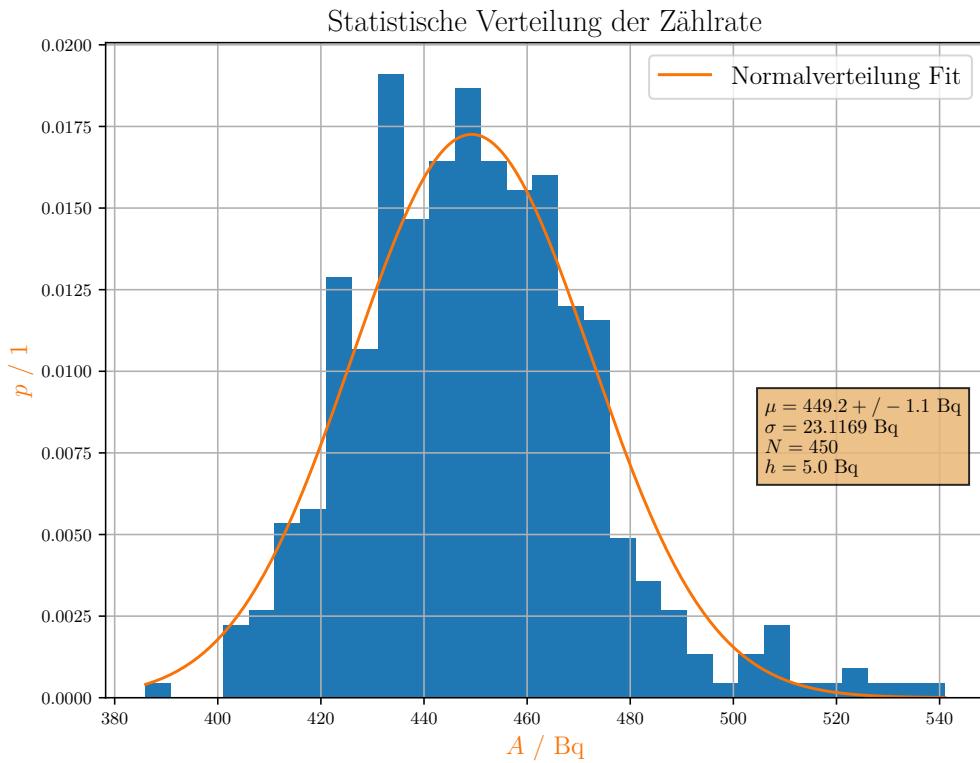


Abbildung 6.2: Verteilung der Zählraten der $N = 450$ Messungen mit Torzeit jeweils 1 s. Dabei ist die Aktivität A in Bq gegen die auf eins normierte Anzahl der Ereignisse p (\equiv Wahrscheinlichkeit) aufgetragen. Zusätzlich ist eine Normalverteilung mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ , welche beide aus den Messdaten ermittelt wurden, dargestellt.

6.3 Verifizierung des Abstandsgesetz

Die gemittelten Werte aus Tabelle 5.3 werden nun gegen ihre Aktivität in Abbildung 6.3 aufgetragen. Schließlich werden die Punkte nach dem erwarteten Zusammenhang aus Gleichung 1 mittels Least-Square-Error-Fit gefittet.

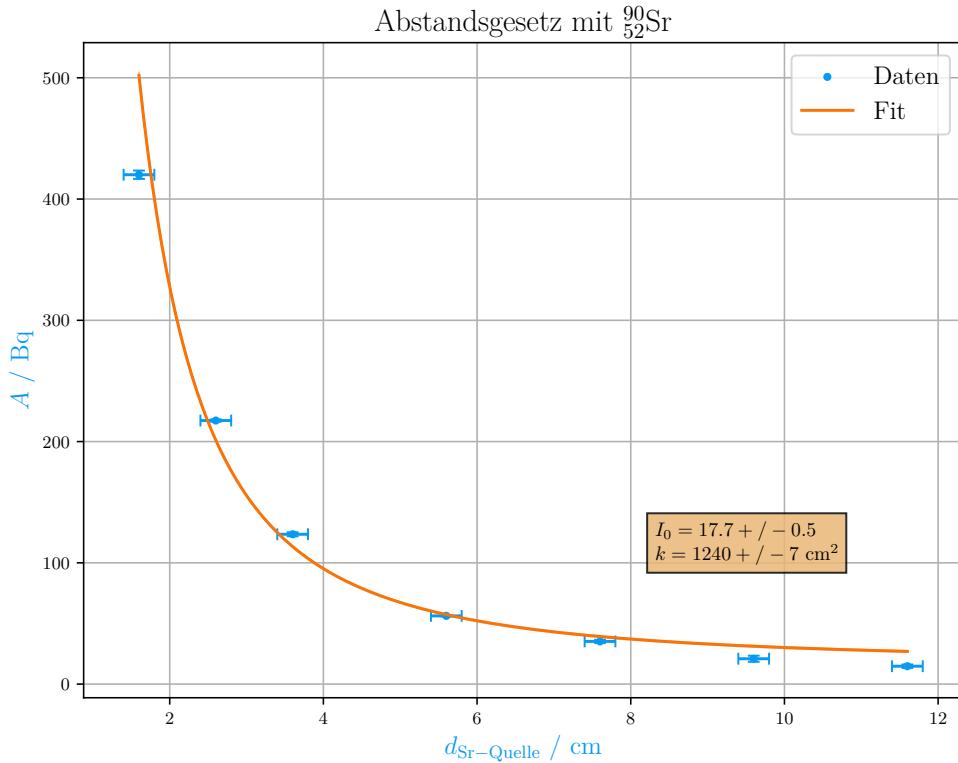


Abbildung 6.3: Aktivität A in Bq der ^{90}Sr Probe aufgetragen gegen den Abstand vom Eingang des Zählrohrs $d_{\text{Sr-Quelle}}$ in cm. Fit nach Gleichung 1 über die gemessenen Daten.

Für das vorliegende Strontium-Isotop ergibt sich somit nach Gleichung 1:

$$I = I_0 + \frac{k}{r^2} = 17,7 \pm 0,5 + \frac{1240 \pm 7}{d_{\text{Sr-Quelle}}^2}$$

6.4 Bestimmung der Endpunktenergie über Absorption in Aluminium

Die Auswertung des Teilversuchs zur Bestimmung der Endpunktenergie in Aluminium wird bereits Vorort vom Betreuer mittels spezieller Software ausgeführt. Die Aktivität in Abhängigkeit der Aluminiumschichtdicke wird dabei am besten logarithmisch, wie in Abbildung 6.4, oder doppelt logarithmisch, wie in Abbildung 6.5, aufgetragen.

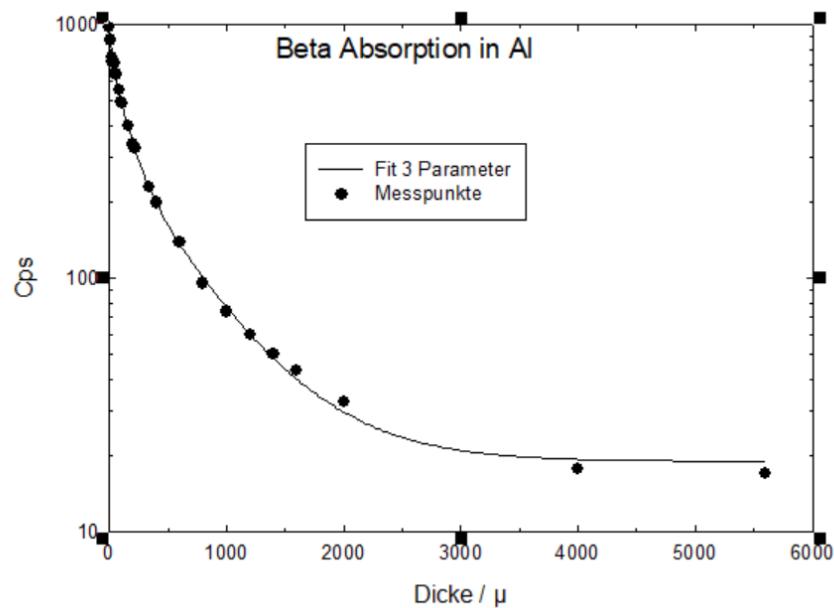


Abbildung 6.4: Absorption der β -Strahlen in einer Aluminium-Platte. Aktivität in Cps \equiv Bq gegen Dicke in μm aufgetragen. Dabei ist die y -Achse logarithmisch skaliert.

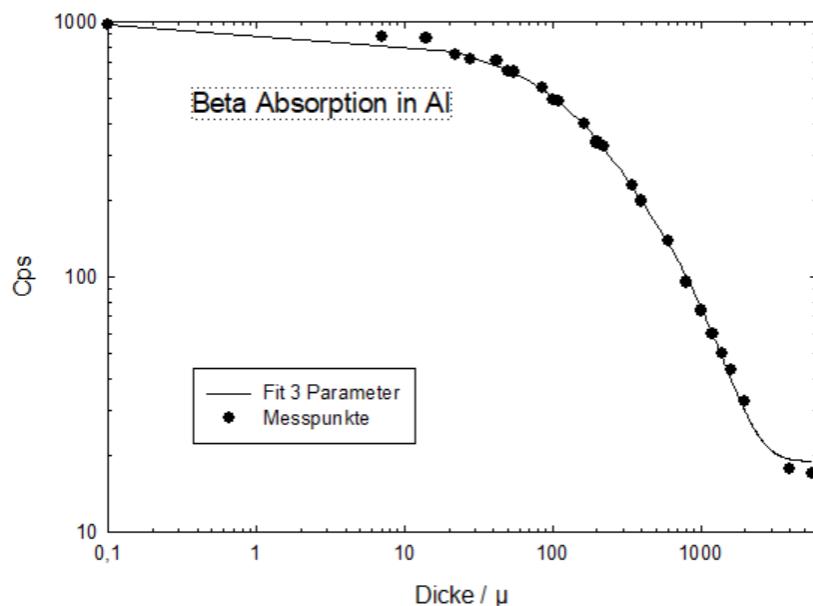


Abbildung 6.5: Absorption der β -Strahlen in einer Aluminium-Platte. Aktivität in Cps \equiv Bq gegen Dicke in μm aufgetragen. Dabei sind y -Achse sowie x -Achse logarithmisch skaliert.

Da ein radioaktives Nuklid in einer Zerfallsreihe zerfällt, ist es i.A. (nach geraumer) Zeit so, dass grundsätzlich mehrere Isotope (sprich auch die Zerfallsprodukte des Mutterkerns) zur Strahlung beitragen. Aus diesem Grund wird auch ein Fit mit drei Parametern gewählt, dies entspricht der Superposition dreier Exponentialkurven. Dieser Fit sollte so im wesentlichen die drei prominentesten Strahler in der Zerfallsreihe beschreiben und resultiert aus einer Überlagerung der einzelnen Zerfälle. Daraus ergeben sich die drei Zerfallskonstanten in Tabelle 6.1. Mittels Gleichung 3 lassen sich nun die Endpunktenergien berechnen, welche ebenfalls in Tabelle 6.1 tabellarisch aufgelistet sind.

Tabelle 6.1: Aus den Datensätzen des Betreuers bestimmte Zerfallskonstanten μ_i in cm^{-1} einer etwas stärkeren ^{226}Ra -Quelle und ihrer zwei prominentest-strahlenden Tochterkerne sowie daraus mittels Gleichung 3 bestimmte Endpunktenergien E_i in MeV. Da die Unsicherheit der Zerfallskonstanten (und daraus resultierend auch die der Endpunktenergien) nicht weiter spezifiziert wurde, wird sie als implizit gegeben angenommen. $i \dots$ Index

| $i / 1$ | μ / cm^{-1} | E / MeV |
|---------|-----------------------------|---------------------|
| 1 | $764,885\,40 \pm 0,000\,05$ | $0,1364 \pm 0,0011$ |
| 2 | $78,945\,50 \pm 0,000\,05$ | $0,699 \pm 0,006$ |
| 3 | $16,882\,10 \pm 0,000\,05$ | $2,119 \pm 0,017$ |

6.5 Messung des Beta-Energiespektrums mittels Magnetspektrometer

Aus den gemessenen Werten in Tabelle 5.5 können nun unter Verwendung der umgeschriebenen Formel der Lorentzkraft (siehe Gleichung 4) die Energie sowie auch der Impuls der Teilchen des Zerfalls von ^{22}Na bestimmt werden. Die errechneten Werte sind in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Tabelle 6.2: Errechnete Energien und Impulse aus der Messreihe einer $^{22}_{11}\text{Na}$ -Probe zum β -Spektrum in Tabelle 5.5. Mit B der Stärke des ablenkenden Magnetfelds in mT, der Aktivität A_{mean} in Bq, und der kinetischen Energie der Elektronen E_{kin} in MeV sowie deren Impuls p in MeV.

| B / mT | A_{mean} / Bq | E_{kin} / MeV | p / MeV |
|----------|------------------------|------------------------|-------------------|
| 4,0 | 136 \pm 5 | 0,0035 \pm 0,0008 | 0,060 \pm 0,007 |
| 9,7 | 181 \pm 7 | 0,020 \pm 0,004 | 0,145 \pm 0,012 |
| 15,8 | 242 \pm 17 | 0,052 \pm 0,008 | 0,237 \pm 0,018 |
| 19,9 | 276,5 \pm 1,5 | 0,081 \pm 0,011 | 0,30 \pm 0,03 |
| 25,0 | 311,5 \pm 0,5 | 0,123 \pm 0,016 | 0,37 \pm 0,03 |
| 30,8 | 368 \pm 5 | 0,18 \pm 0,03 | 0,46 \pm 0,04 |
| 35,5 | 364 \pm 17 | 0,23 \pm 0,03 | 0,53 \pm 0,04 |
| 40,1 | 343,5 \pm 0,5 | 0,28 \pm 0,03 | 0,60 \pm 0,04 |
| 45,1 | 306,0 | 0,34 \pm 0,04 | 0,68 \pm 0,05 |
| 50,1 | 271,0 \pm 1,0 | 0,40 \pm 0,04 | 0,75 \pm 0,05 |
| 55,5 | 237,5 \pm 0,5 | 0,47 \pm 0,05 | 0,83 \pm 0,06 |
| 60,0 | 198,0 | 0,52 \pm 0,05 | 0,90 \pm 0,06 |
| 66,5 | 164 \pm 7 | 0,61 \pm 0,06 | 1,00 \pm 0,07 |

Schließlich können die Werte auch noch grafisch wie etwa in Abbildung 6.6 dargestellt werden.

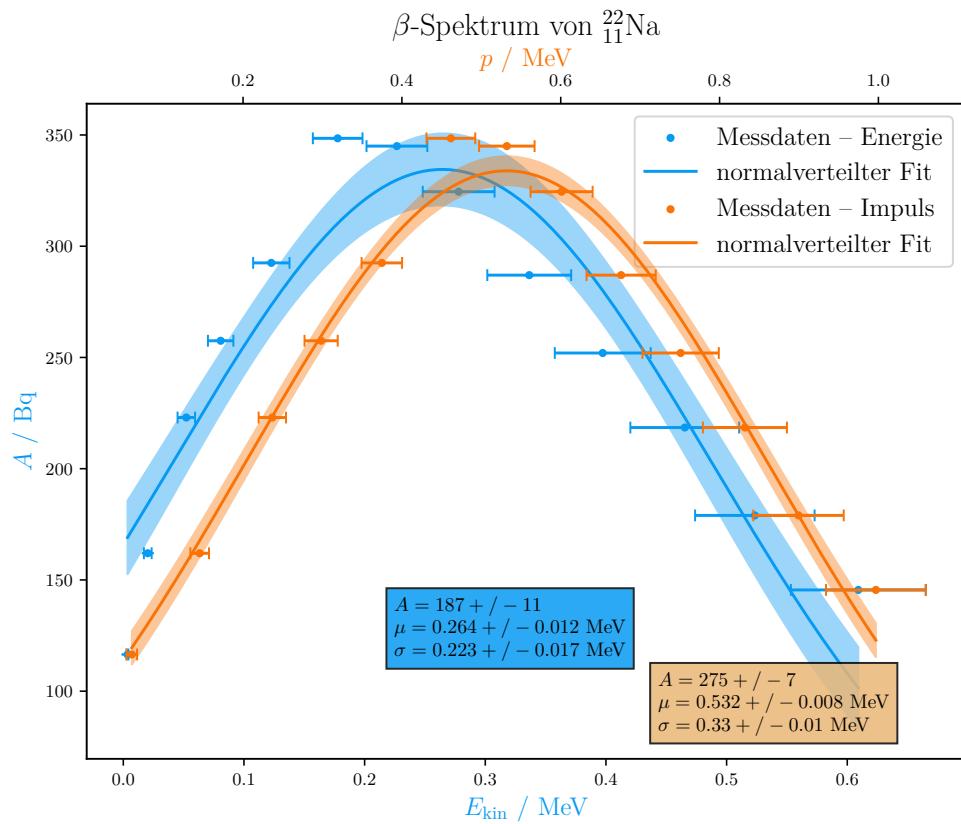


Abbildung 6.6: Errechnete Energien und Impulse aus der Messreihe einer ^{22}Na -Probe zum β -Spektrum in Tabelle 5.5. Blau: Energie, orange: Impuls

6.6 Gammaspektrum von Ra-226

Nachdem in Unterabschnitt 5.7 und Unterabschnitt 5.8 die Spektren von ^{137}Cs (als Referenz) und ^{226}Ra (als zu untersuchendes) aufgenommen wurden, kann damit der nachfolgende Plot in Abbildung 6.7 erstellt werden.

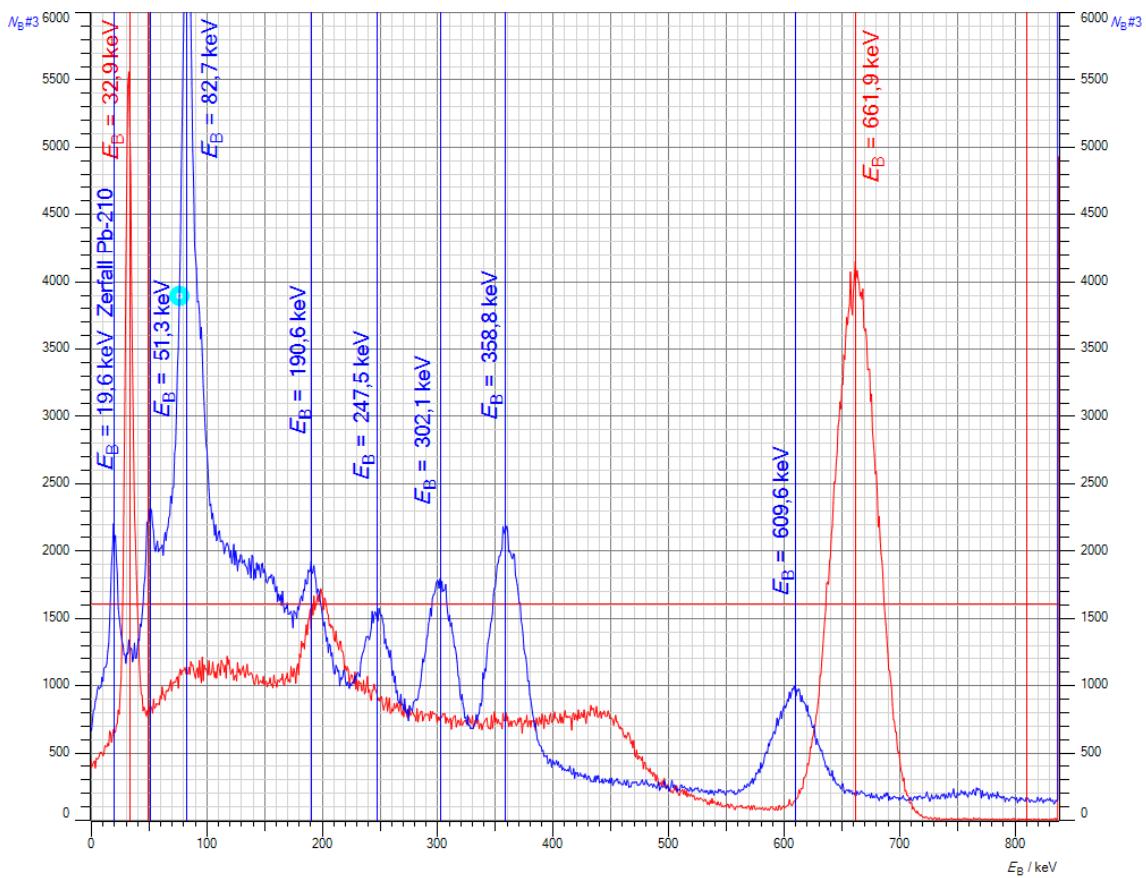


Abbildung 6.7: Gammaspektren der radioaktiven Isotope ^{137}Cs (rot) und ^{226}Ra (blau) und deren Zerfallsprodukte.

7 Diskussion

Qualitative Analyse der Abschirmung

Anhand von Tabelle 5.1 lässt sich deutlich der Einfluss unterschiedlicher Materialien auf die hinter der Barriere gemessene Aktivität erkennen. Der erste signifikante Einbruch ((236 ± 5) Bq auf (122 ± 3) Bq) ergibt sich aus der vollständigen Abschirmung der α -Strahlung. Diese ist als Teilchenstrahlung naturgemäß besonders einfach durch jegliche Form von Materie abzuschirmen. β -Strahlung dagegen lässt sich nicht von beliebigen Materiebarrieren in die Flucht schlagen. Dies lässt sich etwa am Sprung von Papier auf die dünnste Aluminiumschicht erkennen ((122 ± 3) Bq auf (50 ± 6) Bq). Wählt man weiters dicke oder dichte Materialien (dickere Aluminiumplättchen), so lässt sich auch γ -Strahlung reduzieren. Die hier verwendeten Barrieren reichten jedoch nicht aus, um die γ -Strahlung vollends abzuschirmen.

Zählrohrcharakteristik

Betrachtet man Abbildung 6.1, so lässt sich erkennen, dass über einen Bereich von 340 V

bis 600 V die Zählrate (bei unveränderter Probe) konstant bleibt. Das Handbuch des Fens-terzählrohrs (559 01) beschreibt das Einsetzen des Instruments bei 350 V bis 380 V und die maximal zulässige Spannung als 600 V. Dies deckt sich mit den gemessenen Daten und wirkt damit plausibel.

Zählrohrstatistik

Das Histogramm auf Abbildung 6.2 zeigt die Zerfallswahrscheinlichkeit pro Aktivität des radioaktiven Isotops. Ein Zählexperiment unterliegt prinzipiell einer Poisson-Verteilung. Je höher die Zählrate jedoch ist, desto mehr nähert sich eine Poisson-Verteilung einer Normalverteilung an. Ebenfalls auf dieser Abbildung befindet sich bereits der dazugehörige Fit auf eine entsprechende Normalverteilung, welche sich mit den Daten deckt. Damit kann gezeigt werden, dass die Näherung gerechtfertigt ist.

Abstandsgesetz

Der reziprok-quadratische Verlauf der Aktivität mit dem Abstand, die sich direkt proportional zur dazugehörigen Intensität verhält, ist klar auf Abbildung 6.3 erkennbar. Der Fit stimmt signifikant mit den gemessenen Daten überein.

Endpunktenergie

Das Beer-Lambert'sche Gesetz (Gleichung 2) schreibt einen exponentiellen Abfall der Intensität mit zunehmender Abschirmdicke vor. Dieser Zusammenhang ist deutlich auf Abbildung 6.4 erkennbar. Der exponentielle Fit wurde bereits vom Betreuer während der Laboreinheit erstellt und ist nicht ganz trivial: Da beim Zerfall des Mutterkerns ihrerseits wieder radioaktive Tochterkerne entstehen, ergibt sich eine Superposition mehrerer exponentieller Abnahmen. Die gemessenen Daten müssen dann dahingehend gefittet werden, dass diese Überlagerung berücksichtigt wird. Tatsächlich stimmen die vom Betreuer erhaltenen Werte mit der Zerfallsreihe von ^{226}Ra überein. Die Energie $E_2 = (0,699 \pm 0,006)$ MeV beschreibt dabei einen Zerfall zu ^{214}Pb , die Energie $E_3 = (2,119 \pm 0,017)$ MeV zu ^{214}Bi .

Beta-Energiespektrum

Der ermittelte Wert des peaks des β^+ -Spektrums ergibt sich aus der freigesetzten Energie bei Annihilation eines emittierten Positrons mit einem freien Elektron Laut Theorie [5] wird dabei doppelt eine Energie von $E_{\text{lit}} = 511$ keV freigesetzt. Größenordnungstechnisch stimmt der experimentell erhaltene Mittelwert von $E_{\text{exp}} = (532 \pm 8)$ keV also mit der Theorie überein, allerdings nicht signifikant. Im Bereich des Maximums der Kurve ist anhand des Unsicherheitsbands ersichtlich, dass die Messwerte hier weiter streuen als weiter abseits des peaks. Dies lässt sich etwa anhand von leichten Ungenauigkeiten während der Experimentführung erklären. Bereits kleine Erschütterungen der Sonde würden zu sichtbaren Abweichungen führen.

Gammaspektrum von Ra-226

Die auf Abbildung 6.7 eingezeichneten peaks werden nun in Tabelle 7.1 mit den Literaturwerten verglichen.

Tabelle 7.1: Vergleich der erhaltenen lokalen Maxima der Energien E_{exp} des γ -Spektrums von ^{226}Ra mit den Literaturwerten E_{lit} [6]. Für die experimentell ermittelten Werte sowie die Literaturwerte wurde keine explizite Unsicherheit angegeben, also wird sie als implizit gegeben angenommen.

| Substanz | $E_{\text{lit}} / \text{keV}$ | $E_{\text{exp}} / \text{keV}$ |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $^{210}_{82}\text{Pb}$ | 19,6 | 19,6 |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$ | 53 | 51,3 |
| $^{214}_{84}\text{Po} ^{214}_{83}\text{Bi}$ | 79,3 und 77,1 | 82,7 |
| $^{222}_{86}\text{Rn}$ | 186 | 190,6 |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$ | 242 | 247,5 |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$ | 295 | 302,1 |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$ | 352 | 358,8 |
| $^{214}_{84}\text{Po}$ | 609 | 609,6 |

Wie in Tabelle 7.1 ersichtlich ist, stimmen die Werte großteils signifikant mit den Literaturwerten überein, zumindest großenordnungstechnisch gibt es keine Diskrepanzen. Um noch bessere Ergebnisse zu erzieheln, kann natürlich die Genauigkeit des Experiments weiter erhöht werden, indem etwa länger gemessen wird oder eine längere Torzeit gewählt wird.

8 Zusammenfassung

Im vorliegenden Praktikum zu Zählrohren und Radioaktivität wurden diverse Proben auf ihre radioaktiven Zerfallseigenschaften untersucht. Es wurden qualitative sowie quantitative Unterschiede der drei unterschiedlichen radioaktiven Strahlungsarten – α -, β - und γ -Strahlung – behandelt. So lassen sich die unterschiedlichen Strahlungsarten unterschiedlich leicht abschirmen. Beispielsweise gilt für die abschirmenden Eigenschaften: Luft < Papier < Aluminium. Allen gemein ist jedoch die quadratische Abnahme mit dem Radius. Die abschirmende Wirkung von Objekten hängt einerseits vom Material ab (Dichte), andererseits von der Dicke, da die Intensität exponentiell mit der Dicke der Barriere abnimmt.

Die Endpunktenergien einer ^{22}Na -Probe und ihrer Zerfallsprodukte wurde untersucht. Die dabei erhaltenen Werte seien hier noch einmal in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Tabelle 8.1: Zusammenfassung der bestimmten Zerfallskonstanten μ_i in cm^{-1} einer ^{226}Ra -Quelle und ihrer zwei prominentesten Tochterkerne sowie daraus bestimmte Endpunktenergien E_i in MeV. $i \dots \text{Index}$

| $i / 1$ | μ / cm^{-1} | E / MeV |
|---------|-----------------------------|---------------------|
| 1 | $764,885\,40 \pm 0,000\,05$ | $0,1364 \pm 0,0011$ |
| 2 | $78,945\,50 \pm 0,000\,05$ | $0,699 \pm 0,006$ |
| 3 | $16,882\,10 \pm 0,000\,05$ | $2,119 \pm 0,017$ |

Abschließend wurde anhand des Referenzspektrums von ^{137}Cs das γ -Spektrum von ^{226}Ra untersucht und die lokalen Maxima den jeweiligen Zerfällen zu Tochterkernen zugeordnet. Dies sei auch noch einmal in Tabelle 8.2 tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 8.2: Vergleich der erhaltenen lokalen Maxima der Energien E_{exp} des γ -Spektrums von ^{226}Ra mit den Literaturwerten E_{lit} .

| Substanz | $E_{\text{lit}} / \text{keV}$ | $E_{\text{exp}} / \text{keV}$ |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $^{210}_{82}\text{Pb}$ | 19,6 | 19,6 |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$ | 53 | 51,3 |
| $^{214}_{84}\text{Po} ^{214}_{83}\text{Bi}$ | 79,3 und 77,1 | 82,7 |
| $^{222}_{86}\text{Rn}$ | 186 | 190,6 |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$ | 242 | 247,5 |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$ | 295 | 302,1 |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$ | 352 | 358,8 |
| $^{214}_{84}\text{Po}$ | 609 | 609,6 |

Literaturverzeichnis

- [1] Institut für Experimentalphysik und Institut für Materialphysik. „Strahlungsmessung mit Zählrohr und Szintillationszähler“. In: (2016). URL: https://tc.tugraz.at/main/pluginfile.php/299189/mod_folder/content/0/ZR_Praktikum_WS18.pdf?forcedownload=1.
- [2] NIST. „1927: NBS gold leaf electroscope“. In: 2009. URL: <https://www.nist.gov/pml/marie-curie-and-nbs-radium-standards/1927-nbs-gold-leaf-electroscope>.
- [3] E. Lebigot. uncertainties. 2022. URL: <https://github.com/lebigot/uncertainties/>.
- [4] R. Dämon u. a. „Einführung in die physikalischen Messmethoden“. In: Bd. 7. 2021.
- [5] Radioaktivität - Fortführung. Beta-Plus-Zerfall von Natrium 22. Website. URL: <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-fortfuehrung/aufgabe/beta-plus-zerfall-von-natrium-22>.
- [6] R. R. Kinsey. The radioactive series of radium-226. Website. Dez. 1997. URL: <https://www.1d-didactic.de/software/524221en/Content/Appendix/Ra226Series.htm>.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Zerfallsreihe von Ra-226 | 4 |
| 2.2 | Aufbau eines Zählrohrs | 6 |
| 2.3 | Aufbau eines Magnetspektrometer | 6 |
| 2.4 | Aufbau eines Szintillationszählers | 7 |
| 3.1 | Aufbau des Magnetspektrometers | 8 |
| 3.2 | Aufbau des Zählrohrs | 8 |
| 3.3 | Aufbau des Szintillationszählers | 9 |
| 5.1 | Zerfall Na-22 | 13 |
| 6.1 | Zählrate in Abhängigkeit der Spannung | 18 |
| 6.2 | Verteilung der Zählraten | 19 |
| 6.3 | Nachweis des Abstandsgesetzes mittels Sr-90 | 20 |
| 6.4 | Absorption Betastrahlen in einer Aluminium-Platte – logarithmisch | 21 |
| 6.5 | Absorption Betastrahlen in einer Aluminium-Platte – doppelt-logarithmisch | 21 |
| 6.6 | Energien und Impulse Na-22 | 24 |
| 6.7 | Gammaspektrum Cs und Ra | 25 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Geräteliste | 10 |
| 5.1 | α -, β -, γ -Strahlung – qualitativ | 11 |
| 5.2 | Zählrohrcharakteristik | 12 |
| 5.3 | Aktivität gegen Abstand bei Sr-90 | 13 |
| 5.4 | Aktivität hinter Aluminiumplatten | 15 |
| 5.5 | β -Spektrum | 16 |

| | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1 | Zerfallskonstante und Endpunktenergien | 22 |
| 6.2 | Betaspektrum – Energie und Impuls | 23 |
| 7.1 | Gammaspektrum Literaturvergleich | 27 |
| 8.1 | Zerfallskonstante und Endpunktenergien – Zusammenfassung | 28 |
| 8.2 | Gammaspektrum Literaturvergleich – Zusammenfassung | 28 |