

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel des Versuchs</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>2</b>
3.1	Kalibrierung des Gammaskpektrometers . . . . .	2
3.2	Identifikation einer radioaktiven Probe . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>10</b>
4.1	Versuchsergebnisse . . . . .	10
4.2	Fehlerquellen und Verbesserungsvorschläge . . . . .	11
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>13</b>
A.1	Abbildungen . . . . .	13
A.2	Rohdaten . . . . .	16

# 1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch sollte mithilfe von Gammaskopie ein unbekannter, radioaktiver Stoff identifiziert werden. Dazu sollte zunächst der Detektor mit den drei bekannten, strahlenden Proben Na-22 (Natrium), Co-60 (Cobalt) und Cs-137 (Cäsium) sowie durch eine Messung der Untergrundstrahlung kalibriert werden.

# 2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Es gab einen Detektor in einer Abschirmung aus Blei, der über einen Adapter mit einem PC verbunden war. Der Detektor enthält einen Szintillator, der beim Durchgang von energiereichen Photonen oder geladenen Teilchen angeregt wird und diese Anregungsenergie in Form von Licht wieder abgibt. Außerdem ist ein Photomultiplier enthalten, der diese schwachen Lichtsignale verstärkt. Je nach Intensität lassen sich so Rückschlüsse auf die Energie, mit der der Szintillator angeregt wurde, treffen.

Zunächst wurde die Na-22 Probe im Detektor platziert. Auf dem PC wurden die Daten vom Detektor mit dem Programm PRA analysiert. Dafür wurde die Kanalbreite am PC auf 0,01 gestellt und anschließend das Spektrum so lange aufgenommen, bis klare Peaks zu erkennen waren. Die Ereigniszahlen der einzelnen Kanäle wurden als Textdatei exportiert. Die Messung wurde angehalten, die Messdauer notiert und die Daten für das Spektrum gespeichert. Dieses Vorgehen wurde für alle bekannten Proben und die unbekannte Probe wiederholt. Zuletzt wurde analog eine Messung ohne Probe durchgeführt, um das Untergrundspektrum aufzunehmen.

Eine Skizze des Versuchsaufbaus ist in Abb. 1 zu sehen.

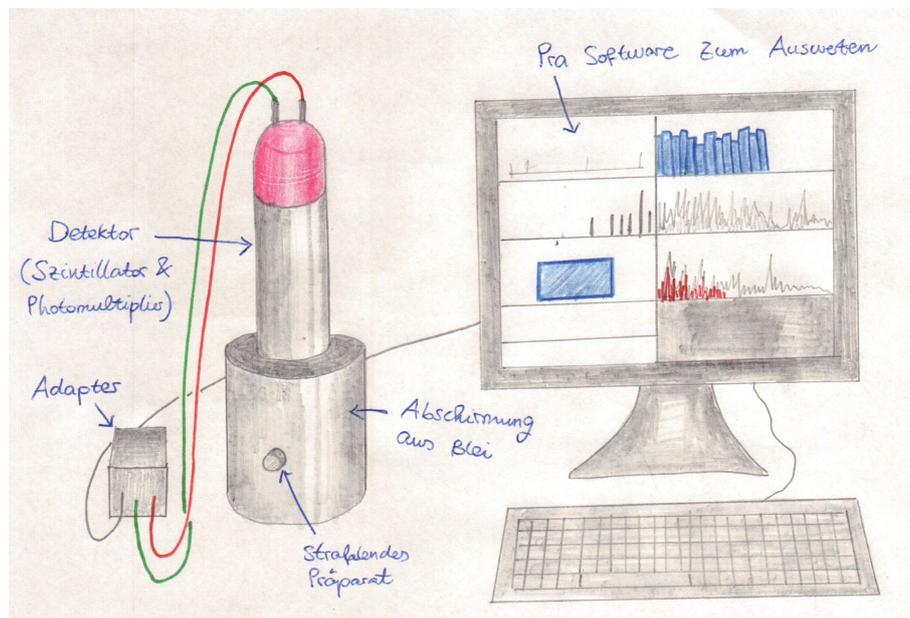


Abbildung 1: Skizze des Versuchsaufbaus. In den Detektor konnte auf der einen Seite von unten ein strahlendes Präparat platziert werden. Der Detektor (in dem sich ein Szintillator und ein Photomultiplier befand) wurde dann über einen Adapter mit dem PC verbunden. Auf dem PC wurden die Messdaten mit dem Programm PRA analysiert.

## 3 Auswertung

### 3.1 Kalibrierung des Gammaskpektrometers

Um mit dem Gammaskpektrometer eine unbekannte Probe identifizieren zu können, musste es zunächst kalibriert werden. Dafür wurden die Spektren dreier Quellen, Na-22, Co-60 und Cs-137, aufgenommen, bei denen markante Peaks mit bekannten Energien auftreten. Aus der Position der Peaks der bekannten Proben kann eine Relation zwischen den Kanälen des Detektors und der Energie der Peaks bestimmt werden.

Für die drei Kalibrationsquellen wurden mit dem Messgerät die Anzahl der Anregungen  $N$  der verschiedenen Kanäle  $k$  erfasst. Da für die verschiedenen Messreihen über unterschiedliche Zeitdauern  $t$  gemessen wurde, wurde zunächst für alle Kalibrationsmessungen die Zählrate

$$R = \frac{N}{t}, \quad (1)$$

also die Anzahl der Ereignisse  $N$  pro Sekunde, berechnet. Die unterschiedlichen Messdauern für die verschiedenen Messungen sind in Tabelle 1 eingetragen.

	Untergrundmessung	Na-22	Co-60	Cs-137	unbekannte Probe
Messdauer $t$ in s	602,0	444,5	347,5	321,5	600,0

Tabelle 1: Messdauern für die Messungen der Kalibrationsquellen Na-22, Co-60 und Cs-137, der Messung der Untergrundstrahlung und der Messung für die unbekannte Probe.

Die Angabe des Messprogramms für die Zeit wurde hierbei als exakt angenommen. Der Fehler auf die Anzahl der gemessenen Ereignisse  $N$  wurde mit  $s_N = \sqrt{N}$  abgeschätzt. Der Fehler auf die Zählrate berechnet sich also mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung durch

$$s_R = \frac{s_N}{t} = \frac{\sqrt{N}}{t}. \quad (2)$$

Anschließend wurde die Zählrate  $R$  gegen die Kanalnummer  $k$  aufgetragen.

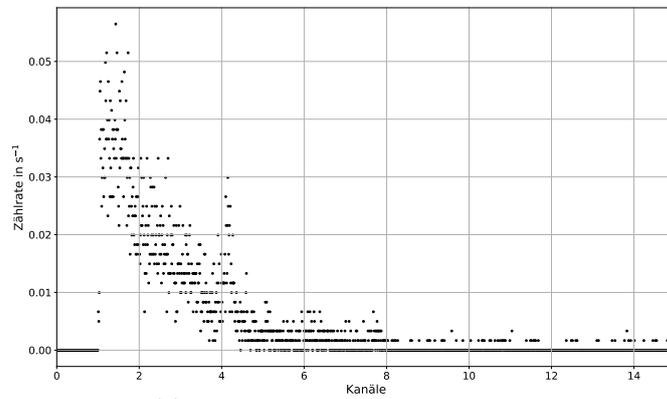
Für die verschiedenen bekannten Proben und die Untergrundstrahlung sind die Auftragungen in Abb. 2 zu sehen.

In den Spektren der bekannten Proben sind deutliche Peaks zu erkennen.

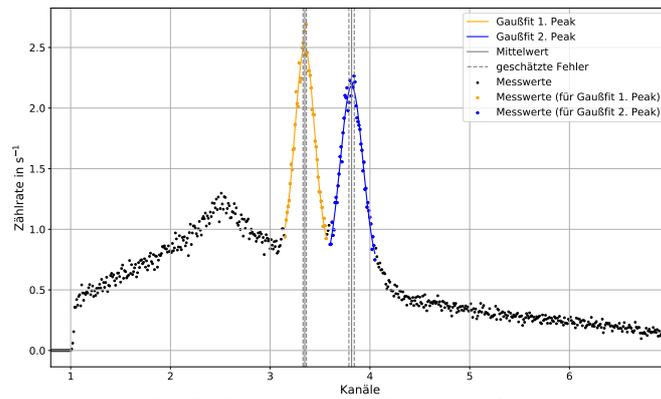
Die Atome der radioaktiven Stoffe, die hier verwendet wurden, zerfallen in andere Atome: Cs-137 zerfällt in Ba-137 und Co-60 in Ni-60. Allerdings befinden sich die Atome die dabei entstehen (Ba-137 und Ni-60) nicht im Grundzustand, sondern in einem angeregten Zustand. Beim Übergang dieser Atome in den Grundzustand wird Energie in Form von Photonen frei, die dann vom Detektor aufgenommen werden. Ba-137 fällt direkt vom angeregten Zustand in den Grundzustand, hierbei wird eine Energie von  $E_{Cs} = 662 \text{ keV}$  [2] frei. Ni-60 fällt vom angeregten zunächst in einen weniger angeregten Zustand, und dann in den Grundzustand. Dabei werden Energien von  $E_{Co,1} = 1172 \text{ keV}$  bzw.  $E_{Co,2} = 1333 \text{ keV}$  frei [2]. In den Spektren erwartet man also für Cäsium einen Peak und für Cobalt zwei Peaks.

Für Cäsium und Cobalt können die beobachteten Peaks gut denen in der Versuchsanleitung [2] beschriebenen Übergängen zugeordnet werden. Bei Natrium gibt es allerdings einen zweiten, nicht in der Versuchsanleitung [2] beschriebenen Peak.

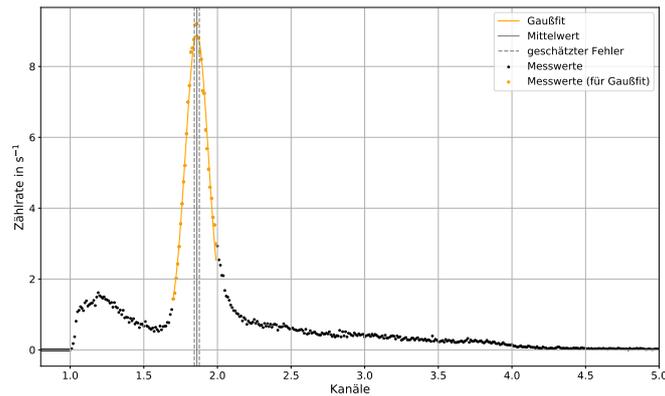
Na-22 zerfällt in Neon, das sich auf einem angeregten Zustand befindet. Fällt dieses Neonatom in den Grundzustand, wird Energie in Form eines Photons frei. Das ist der in der Versuchsanleitung [2] beschriebene erwartete Peak der Energie  $E_{Na,2} = 1277 \text{ keV}$ . Zudem ist noch ein zweiter Peak bei geringerer Energie zu erkennen. Dieser entsteht daraus, dass aus dem Photon, das beim Übergang des angeregten Zustands in den Grundzustand entsteht, ein Elektron und ein Positron entstehen können. Durch die Annihilation des Positrons mit dem Elektron, die sehr schnell passiert, entstehen



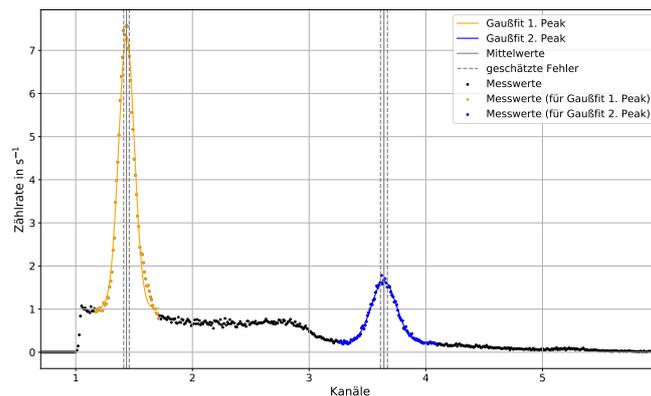
(a) Spektrum der Untergrundzählrate



(b) Spektrum der Zählrate von Co-60



(c) Spektrum der Zählrate von Cs-137



(d) Spektrum der Zählrate von Na-22.

Abbildung 2: Spektren der Zählrate für die bekannten Proben und die Untergrundzählrate. Der Übersicht halber sind die Fehler auf die Datenpunkte nicht mit eingezeichnet, sie sind aber in Abb. 8 im Anhang zu sehen. Um die Kanalnummern der in den Spektren erkennbaren Peaks zu bestimmen, wurde an die Daten im Bereich um die Peaks eine in Gleichung (3) beschriebene Gaußfunktion angepasst. Die erhaltenen Kanalnummern der Peaks sind in grau eingezeichnet. Die Fehler auf die Kanalnummern wurden geschätzt, sie sind in grau gestrichelt eingetragen. Die Anpassung der Peaks ist für Na-22 in Abb. 9, für Co-60 in Abb. 10 und für Cs-137 in Abb. 11 im Anhang noch einmal genauer zu sehen.

zwei Photonen der Energie  $E_{Na,1} = 511 \text{ keV}$  [1]. Das entspricht der Ruheenergie eines Elektrons [7]. Dadurch entsteht also der zweite Peak, der bei Natrium beobachtbar ist.

Um die Kanalnummern der Peaks zu bestimmen, wurde an die Bereiche, in denen sich die Peaks grob befanden, durch numerische  $\chi^2$ -Minimierung eine Gaußfunktion der Form

$$G(x) = A \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) + C \quad (3)$$

angepasst.

Bei den hier vorliegenden Daten ist es nicht möglich, einen sinnvollen Fit für eine Gaußfunktion mit nur zwei Parametern, dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$ , durchzuführen. Dies liegt zum einen daran, dass das Integral über eine Gaußfunktion mit zwei Parametern eins beträgt. Die hier gemessenen Daten sind allerdings nicht normiert. Deswegen bietet es sich an, einen Parameter  $A$  einzuführen, der die Gaußfunktion skaliert. Da das Integral über eine Gaußfunktion beschränkt ist, nähert sie sich für sehr große und sehr kleine Werte der Null an. Die Daten in dem Bereich, an den die Funktion angepasst werden soll, sind allerdings teilweise sehr weit von der Null entfernt. Um trotzdem einen Fit zu erhalten, der möglichst nah an den Daten liegt, bietet es sich hier also an, eine Verschiebung der Gaußfunktion entlang der  $y$ -Achse um den Wert  $C$  zuzulassen. Somit ist es möglich, die Bedingung, dass die Gaußfunktion für große und kleine Werte gegen Null geht, (die aus der Anpassungsfunktion und nicht aus den Messdaten hervorgeht), zu erfüllen, ohne die Qualität der Anpassung (Nähe der Daten zur Funktion) zu beeinflussen.

Da bei der Anpassung vier Parameter minimiert werden müssen, konnte die Minimierung nicht sinnvoll mit einer selbstgeschriebenen Funktion durchgeführt werden. Deswegen wurde hier die `curve_fit`-Funktion von `scipy.optimize` verwendet. Diese Funktion nutzt entweder die `leastsq`-Funktion oder die `least_squares`-Funktion [6], die auch in `scipy` implementiert sind. Die `leastsq`-Funktion [6] bzw. die `least_squares`-Funktion [5] nutzen  $\chi^2$ -Minimierungsalgorithmen, die in den Funktionen `lmdr` und `lmdif` in `MINPACK` implementiert sind. Diese Funktionen wiederum verwenden eine Implementierung des Levenberg-Marquardt Algorithmus [6, 5], um den Wert für  $\chi^2$  zu minimieren (non-linear least squares).

Die angepassten Funktionen sind auch in Abb. 2 eingetragen.

Die aus den Gaußfunktionen erhaltenen Mittelwerte der Peaks und ihre Fehler sind in Tabelle 2 eingetragen.

	Mittelwerte $\mu$
Na-22, 1. Peak	$1,4349 \pm 0,0013$
Na-22, 2. Peak	$3,6412 \pm 0,0011$
Co-60, 1. Peak	$3,346 \pm 0,002$
Co-60, 2. Peak	$3,8161 \pm 0,0017$
Cs-137, 1. Peak	$1,8600 \pm 0,0010$

Tabelle 2: Aus der Anpassung der Gaußfunktionen erhaltene Mittelwerte der Peaks mit ihren Fehlern für die verschiedenen Peaks der bekannten Proben. Die Spektren mit den angepassten Funktionen sind in Abb. 2 zu sehen.

Bei Betrachtung der in Tabelle 2 aufgelisteten Werte fällt auf, dass die Fehler auf die Mittelwerte unrealistisch klein sind. Deswegen wurde die Fehler auf die Kanalnummern der Peaks von Hand graphisch geschätzt. Die von Hand geschätzten Fehlerbereiche sind auch in Abb. 2 eingetragen. Im Anhang sind für Na-22 in Abb. 9, für Co-60 in Abb. 10 und für Cs-137 in Abb. 11 noch einmal die Peaks einzeln mit den abgeschätzten Fehlerbereichen zu sehen.

Die aus den Mittelwerten der Peaks erhaltenen Kanalnummern mit den geschätzten Fehlern sind in Tabelle 3 den Energien der Peaks zugeordnet.

Anschließend wurden die Kanalnummern gegen die Energien aufgetragen. Aus der Versuchsanleitung [2] waren keine Fehler auf die Energien bekannt, diese wurden somit als exakt angenommen.

	Kanalnummern $k$	Energien $E$ in keV
Na-22, 1. Peak	$1,43 \pm 0,03$	511
Na-22, 2. Peak	$3,64 \pm 0,03$	1277
Co-60, 1. Peak	$3,346 \pm 0,017$	1172
Co-60, 2. Peak	$3,81 \pm 0,03$	1333
Cs-137, 1. Peak	$1,860 \pm 0,017$	622

Tabelle 3: Die aus der Anpassung von Gaußfunktionen an die Spektren der bekannten Proben erhaltenen Kanalnummern der Peaks. Die zugehörigen Fehler wurden von Hand geschätzt. Die Kanalnummern sind den Energien zugeordnet.

Da aber bei einer linearen Regression nur Fehler in  $y$ -Richtung berücksichtigt werden, wurde hier, um die Fehler auf  $k$  in die Regression mit einfließen lassen zu können, die Auftragung  $k$  gegen  $E$  anstatt  $E$  gegen  $k$  gewählt. Die Auftragung ist in Abb. 3 zu sehen.

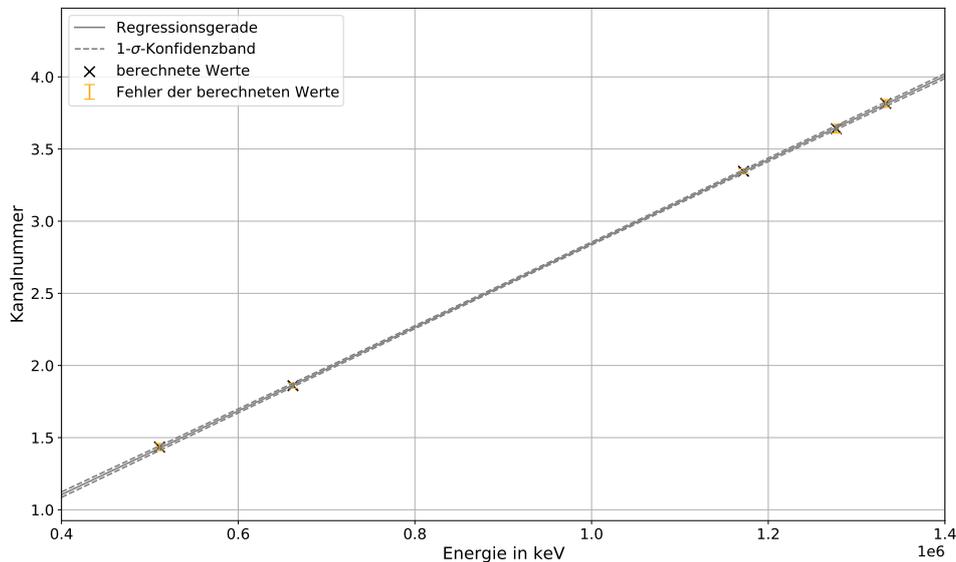


Abbildung 3: Auftragung der Kanalnummern gegen die zugehörigen Energien. Die Fehler auf die Kanalnummern sind auch eingezeichnet, die Energien wurden aus der Versuchsanleitung [2] übernommen und als exakt angenommen. Durch die Daten wurde eine gewichtete lineare Regression der in Gleichung (4) beschriebenen Form durchgeführt. Die Bestwerte der erhaltenen Parameter sind in Gleichung (5) zu sehen, die erhaltenen Regressionsgerade ist in grau eingezeichnet. Für die Regressionsgerade wurde ein  $1\text{-}\sigma$ -Konfidenzband berechnet, das Konfidenzband ist auch mit eingezeichnet. Ein Residuendiagramm ist in Abb. 4 zu sehen.

Ein linearer Zusammenhang ist deutlich zu erkennen. An die Daten wurde eine gewichtete lineare Regression an eine Gerade der Form

$$k = mE + c \quad (4)$$

durchgeführt. Für die Werte der Parameter ergeben sich

$$\begin{aligned} m &= (2,90 \pm 0,03) \cdot 10^{-6} \text{ keV}^{-1} \\ c &= (-0,06 \pm 0,03) \text{ keV.} \end{aligned} \quad (5)$$

Durch Umformen von Gleichung (4) lässt sich also mit

$$E = \frac{k - c}{m} \quad (6)$$

aus der Kanalnummer die zugehörige Energie berechnen.

Der Korrelationskoeffizient der Parameter  $\rho_{cm}$  berechnet sich mit Formeln aus dem Datenanalyse-skript [4](Seite 5) über

$$\rho_{cm} = \frac{s_{cm}}{s_c s_m}, \quad (7)$$

wobei  $s_{cm}$  die Kovarianz der Parameter (Nebendiagonalen der Kovarianzmatrix) bezeichnet. Mit Gleichung (7) ergibt sich für den Korrelationskoeffizienten der Parameter ein Wert von

$$\rho_{cm} = -0,95.$$

Der Korrelationskoeffizient liegt immer im Bereich zwischen  $-1$  und  $1$ , wobei ein Wert von  $0$  darauf hindeutet, dass die Parameter nicht korreliert sind. Je weiter der Wert des Korrelationskoeffizienten von  $0$  entfernt liegt, desto größer ist die Korrelation. Der hier erhaltene Korrelationskoeffizient von  $-0,95$  deutet also auf eine starke Korrelation der Parameter hin. Diese muss in der Fehlerrechnung berücksichtigt werden.

Zusätzlich wurde ein  $1\text{-}\sigma$ -Konfidenzband eingezeichnet. Das Konfidenzband ist auch in Abb. 3 zu sehen. Da das Konfidenzband schwer zu erkennen ist, ist es in Abb. 4 noch einmal in einem Residuendiagramm dargestellt.

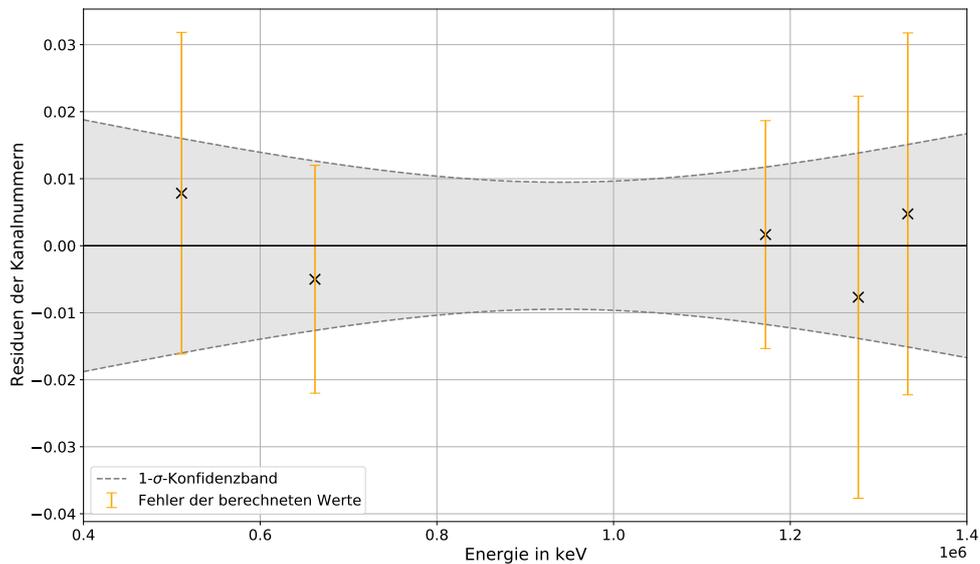


Abbildung 4: Residuendiagramm der Regression an die Auftragung der Kanalnummern gegen die Energien in Abb. 3. Die Fehler auf die Kanalnummern sowie das  $1\text{-}\sigma$ -Konfidenzband sind auch mit eingezeichnet.

### 3.2 Identifikation einer radioaktiven Probe

Für das Spektrum der unbekannt Probe wurde wie zuvor mit Gleichung (1) die Zählrate  $R_0$  bestimmt, auch hier wurde der Fehler mit Gleichung (2) berechnet. Analog wurde für die Untergrundmessung die Zählrate  $R_u$  bestimmt. Das Spektrum der Zählrate des Steins ist in Abb. 5 zu sehen.

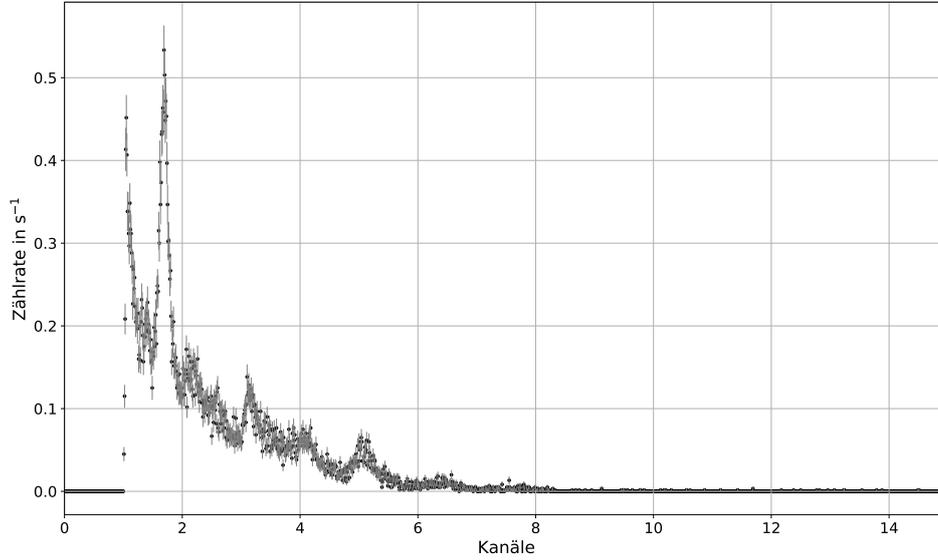


Abbildung 5: Spektrum der Zählrate der unbekannt Probe mit den in Gleichung (2) berechneten Fehlern.

Um die tatsächliche Zählrate des Steins  $R_{\text{unb}}$  zu bestimmen, wurde von der gemessenen Zählrate  $R_0$  die Untergrundzählrate  $R_u$  abgezogen:

$$R_{\text{unb}} = R_0 - R_u. \quad (8)$$

Die Untergrundzählrate ist in Abb. 2a dargestellt. Die Unsicherheit auf  $R_{\text{unb}}$  berechnet sich durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung mit

$$s_{R_{\text{unb}}} = \sqrt{s_{R_0}^2 + s_{R_u}^2}. \quad (9)$$

Das so erhaltene Spektrum der unbekannt Probe ist in Abb. 6 zu sehen. Der Übersicht halber wurden hier die Fehlerbalken auf die Counts nicht mit eingezeichnet, im Anhang in Abb. 12 ist es mit den Fehlerbalken zu sehen.

Bei Betrachtung von Abb. 6 lassen sich vier Peaks erkennen. Um die Kanalnummern dieser Peaks zu erhalten, wurden wieder Gaußfunktionen der in Gleichung (3) beschriebenen Form an die Peaks angepasst. Da der erste Peak zwar klar zu erkennen, aber halb abgeschnitten war, wurde die Anpassung der Gaußfunktion nicht mit `curve_fit` von `scipy.optimize`, sondern von Hand durchgeführt. Die erhaltenen Gaußfunktionen sind in auch in Abb. 6 mit eingezeichnet, die für die Fits verwendeten Werte sind farbig markiert. Im Anhang in Abb. 13 sind die einzelnen Peaks mit den Gaußfunktionen und den Fehlern noch einmal genauer zu sehen.

Für die Kanalnummern der Peaks ergibt sich

$$\begin{aligned} k_1 &= 0,98 \pm 0,07 \\ k_2 &= 1,69 \pm 0,02 \\ k_3 &= 3,15 \pm 0,06 \\ k_4 &= 5,06 \pm 0,05 \end{aligned} \quad (10)$$

Hierbei wurden wieder die Fehler auf die Kanalnummern von Hand geschätzt. Die geschätzten Fehlerbereiche sind auch in Abb. 6 zu sehen.

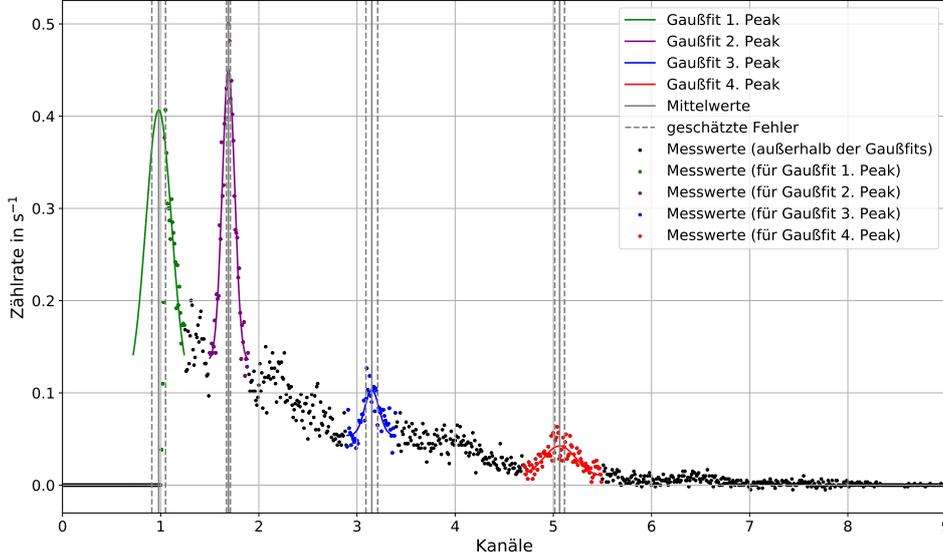


Abbildung 6: Spektrum der Zählrate der unbekannt Probe. Die Untergrundzählrate wurde abgezogen. Der Übersicht halber sind die Fehler hier nicht mit eingezeichnet, sie sind im Anhang in Abb. 12 zu sehen. Um die Kanalnummern der im Spektrum erkennbaren Peaks zu bestimmen, wurde an die Daten im Bereich um die Peaks eine in Gleichung (3) beschriebene Gaußfunktion angepasst. Die erhaltenen Kanalnummern sind in grau eingezeichnet. Die Fehler auf die Kanalnummern wurden geschätzt, sie sind in grau gestrichelt eingezeichnet.

Mit Gleichung (6) lassen sich aus den Kanalnummern die zugehörigen Energien bestimmen. Auf diese berechneten Energien ergeben sich durch die Bestimmung von  $k_i$  ein statistischer Fehler, und durch die Umrechnung mit den aus der Regression erhaltenen Parametern  $m$  und  $c$  ein systematischer Fehler.  $k_i$  stehen hier für die einzelnen Kanalnummern der Peaks des Spektrums des Steins. Mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung erhält man für den statistischen Fehler auf die Energie

$$s_{E,\text{stat}} = \frac{s_k}{m}. \quad (11)$$

Für die Berechnung des systematischen, aus der Unsicherheit der Parameter der linearen Regression in Gleichung (5) folgenden Fehlers muss die Korrelation der Parameter berücksichtigt werden. Mit den Formeln aus dem Datenanalyseskript [4] (Seite 12) erhält man

$$(s_{E,\text{sys}})^2 = AV_x A^T, \quad (12)$$

wobei  $V_x$  die aus der Regression erhaltene Kovarianzmatrix

$$\begin{pmatrix} s_c^2 & s_{cm} \\ s_{cm} & s_m^2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

und  $A$  den Zeilenvektor der Ableitungen

$$\left( \frac{\partial E}{\partial c}, \frac{\partial E}{\partial m} \right) = \left( -\frac{1}{m}, -\frac{(k-c)}{m^2} \right) \quad (14)$$

bezeichnet. Durch Berechnung von Gleichung (12) mit den Gleichungen (13) und (14) ergibt sich

$$s_{E,\text{sys}} = \sqrt{\frac{s_c^2}{m^2} + \frac{2(k-c)s_{cm}}{m^3} + \frac{(k-c)^2 s_m^2}{m^4}} \quad (15)$$

für den systematischen Fehler.

Für die Energien ergibt sich also

$$\begin{aligned} E_1 &= 357 \pm 24 \pm 7 \text{ keV} \\ E_2 &= 602 \pm 7 \pm 5 \text{ keV} \\ E_3 &= 1105 \pm 21 \pm 4 \text{ keV} \\ E_4 &= 1765 \pm 17 \pm 9 \text{ keV} \end{aligned} \tag{16}$$

Hierbei wurden die Ergebnisse in der Form

$$E \pm s_{E,\text{stat}} \pm s_{E,\text{sys}}$$

angegeben, also zuerst die statistische, aus der Bestimmung der Positionen der Peaks stammende Unsicherheit und anschließend die systematische, aus der Kalibrierung resultierende Unsicherheit.

## 4 Diskussion

### 4.1 Versuchsergebnisse

Im ersten Versuchsteil wurde das Gammaskpektrometer mithilfe von bekannten Proben kalibriert. Dafür wurden die Peaks in den Spektren der bekannten Proben identifiziert und die zugehörigen Kanalnummern den entsprechenden Energien zugeordnet. Die Auflistung der Kanalnummern und Energien ist in Tabelle 3 zu sehen. Bei Auftragung der Kanalnummern gegen die Energien und Durchführung einer gewichteten linearen Regression der Form  $k = mE + c$  für die Kanalnummer  $k$ , die Energie  $E$  und den Parametern  $m$  und  $c$  ergibt sich

$$m = (2,90 \pm 0,03) \cdot 10^{-6} \text{ keV}^{-1}$$

$$c = (0,06 \pm 0,03) \text{ keV}$$

für die Parameter. Die Energie lässt sich dann aus der Kanalnummer mit

$$E = \frac{k - c}{m}$$

berechnen. Der Korrelationskoeffizient der Parameter beträgt

$$\rho_{cm} = -0,95.$$

Bei Untersuchung einer unbekannt Probe konnten die beobachteten Peaks im gemessenen Spektrum mithilfe der Kalibration den Energien zugeordnet werden. Die Energien, für die die Peaks beobachtet wurden, sind in Gleichung (16) zu sehen. Eine Zusammenstellung der Energien mit den möglicherweise zugehörigen Nukliden ist in Tabelle 4 eingetragen. Für die Energien sind zuerst die statistischen, aus der Bestimmung der Positionen der Peaks resultierende Unsicherheiten, und dann die systematischen, aus der Kalibrierung stammenden Unsicherheiten eingetragen. Um sowohl statistische als auch systematische Fehler zu berücksichtigen, wurden diese bei der Berechnung der  $t$ -Werte zum Vergleich der gemessenen Energien mit den Energien der möglicherweise zugehörigen Nuklide addiert.

Peak	Energie in keV	Bestverträgliches Nuklid	$t$ -Wert des bestver- träglichen Nuklids	weitere mög- liche Nuklide	$t$ -Werte der weiteren möglichen Nuklide
1	$357 \pm 24 \pm 7 \text{ keV}$	Pb-214	0,19	Ac-228	0,61
2	$602 \pm 7 \pm 5 \text{ keV}$	Bi-214	0,62	Ti-208	1,60
3	$1105 \pm 21 \pm 4 \text{ keV}$	Bi-214	0,60	-	-
4	$1765 \pm 17 \pm 9 \text{ keV}$	Bi-214	0,04	Pa-234m Bi-214	1,07 1,37

Tabelle 4: Auflistung der bestimmten Energien der im Spektrum der unbekannt Probe beobachteten Peaks mit den berechneten Unsicherheiten. Für die Energien sind zuerst die statistischen, aus der Bestimmung der Positionen der Peaks resultierende Unsicherheiten, und dann die systematischen, aus der Kalibrierung stammenden Unsicherheiten eingetragen. Zusätzlich sind mögliche, zu den Energien passende Nuklide eingetragen. Für die möglichen Nuklide wurden  $t$ -Werte berechnet. Um sowohl statistische als auch systematische Fehler bei der Bestimmung der Fehler zu berücksichtigen, wurden diese für die Berechnung der  $t$ -Werte addiert.

In Tabelle 4 ist klar zu erkennen, dass es zu jedem beobachteten Peak mindestens ein Nukleid gibt, dessen erwartete Energie sehr gut zur beobachteten passt. Dies wird dadurch deutlich, dass die berechneten  $t$ -Werte deutlich unter zwei liegen, was auf eine gute Verträglichkeit hinweist. Die  $t$ -Werte sind auch in Tabelle 4 eingetragen. Damit ist davon auszugehen, dass der erste Peak zu Pb-214 und die anderen Peaks zu Bi-214 gehören. Für den ersten, den zweiten und den vierten Peak gibt es auch noch andere Nukleide, deren Energie mit der gemessenen verträglich ist. Allerdings liegen diese weiter vom gemessenen Wert entfernt. Dies wird auch durch die zwar noch verträglich, aber wesentlich höheren  $t$ -Werte deutlich.

Die bestverträglichen Nuklide, Pb-214 und Bi-214, sind Teil der Zerfallsreihe von Radium-226. Da Radium-226 auch Teil der Zerfallsreihe von Uran-238 ist, konnten somit Nuklide der Uran-238-Zerfallsreihe nachgewiesen werden. Die Zerfallsreihe von Uran-238 (zu der auch Radium-226 gehört), sind in Abb. 7 aus dem Versuchsaufbau [3] dargestellt. Da jedoch alle von uns bestimmten Peaks zur Uran-238-Zerfallsreihe gehören, konnten keine Nuklide der Th-232-Zerfallsreihe oder anderer Zerfallsreihen nachgewiesen werden.

Für einige der von uns bestimmten Peaks liegen auch andere Nuklide, die nicht zu U-238-Zerfallsreihe gehören, im verträglichen Bereich. Somit kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass nicht doch andere Nuklide vorlagen. Für den dritten beobachteten Peak allerdings ist Bi-214, das in der U-238-Zerfallsreihe liegt, das einzige verträgliche Nuklid. Somit kann zumindest aus diesem Peak eindeutig das Vorhandensein eines zur U-238-Zerfallsreihe zugehörigen Nuklids nachgewiesen werden.

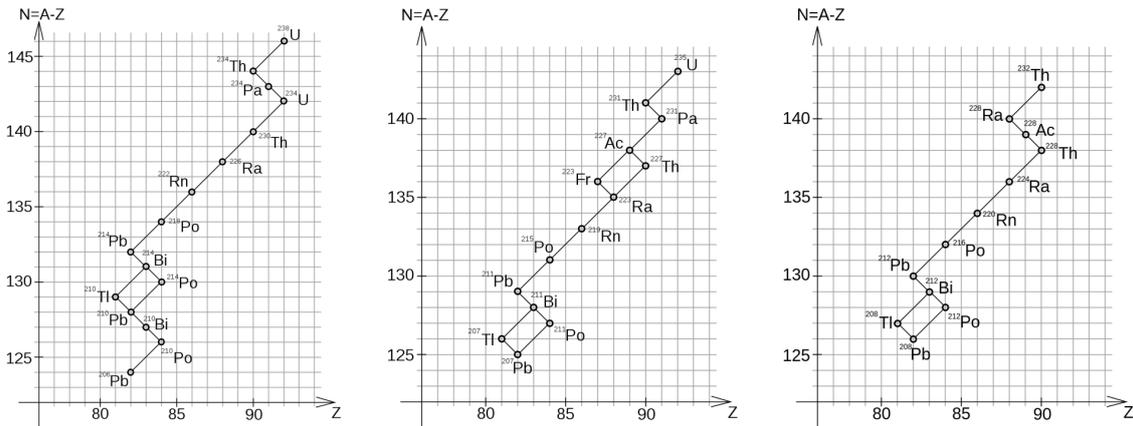


Abbildung 7: Schematische Abbildung der Zerfallsreihen von Uran-238, Uran-235 und Thorium-232. Die in Tabelle 4 aufgelisteten bestverträglichen Nuklide lassen sich der Uran-238-Zerfallsreihe (links) zuordnen. Die Abbildung ist dem Versuchsaufbau [3] entnommen.

## 4.2 Fehlerquellen und Verbesserungsvorschläge

Bei der Messung des Spektrums der Zählrate der unbekannt Probe (Stein) befand sich der 1. Peak außerhalb des Messbereiches und wir mussten den Gaußfit per Hand durchführen. Da der so bestimmte Wert für die Energie des Peaks gut zu den anderen Messdaten sowie den Erwartungen (Nuklide aus der Zerfallsreihe von Uran-238) passt, ist davon auszugehen, dass grob der richtige Bereich getroffen wurde. Aus den Daten allein ist es allerdings nicht ersichtlich, dass der Peak genau an der bestimmten Position liegt. Es ist also nicht auszuschließen, dass der Peak tatsächlich wesentlich weiter links oder rechts lag. Hier wäre es eindeutig besser gewesen, den Messbereich an das Spektrum des Steins anzupassen und die Messung erneut aufzunehmen.

Um für alle Messungen bei der Bestimmung der Positionen der Peaks mehr Datenpunkte verwenden zu können, wäre es von Vorteil gewesen, die Kanalbreite kleiner zu stellen. Dies führt allerdings dazu, dass bei gleicher Messzeit pro Kanal weniger Counts registriert werden. Bei einer niedrigeren Anzahl an registrierten Ereignissen ergibt sich aber durch die Abschätzung der Fehler mit Gleichung (2) ein höherer relativer Fehler, wodurch die Bestimmung der Positionen der Peaks wiederum ungenauer wird. Es ist dann also auch notwendig, über einen längeren Zeitraum zu messen. Vor allem auch die Messung der Untergrundstrahlung, die im Vergleich zu den strahlenden Proben gering ist, hätte von einer längeren Messdauer profitiert.

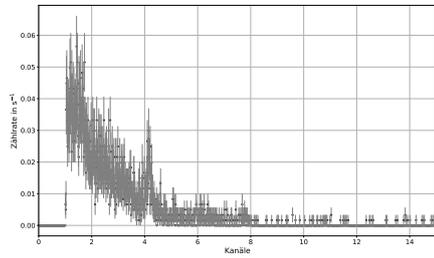
Eine weitere mögliche Verfälschung der Messdaten ergibt sich dadurch, dass sich bei der Messung der Hintergrundstrahlung ein strahlendes Präparat ungefähr 40 cm entfernt vom Sensor befand. Dies bemerkten wir ungefähr nach einem Drittel der Zeit und entfernten des Präparat umgehend. Da der Sensor durch einen Bleimantel vor äußerer Strahlung abgeschirmt wurde und wir nach

dem Entfernen des Präparates keinen Unterschied bemerkten, war es nicht nötig die Messung abzurechnen und neu zu starten. Unter Umständen wurde die Messung dabei aber leicht verfälscht. Selbstverständlich wäre es besser gewesen alle radioaktiv strahlenden Präparate möglichst weit entfernt vom Sensor zu lagern.

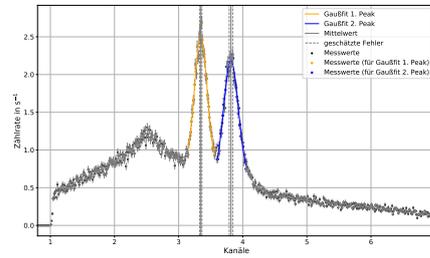
Weiterhin können Fehler auf die Daten durch interne Ungenauigkeiten der technischen Geräte nicht ausgeschlossen werden. So kann es sein, dass ein Teil der Zerfälle vom Sensor nicht registriert wurde und das Programm PRA den Dateninput nicht korrekt verarbeitete.

# A Anhang

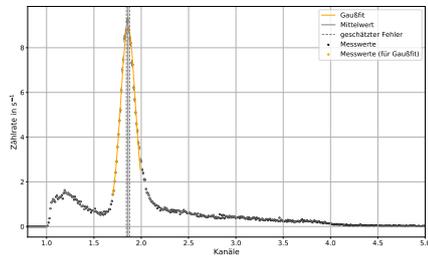
## A.1 Abbildungen



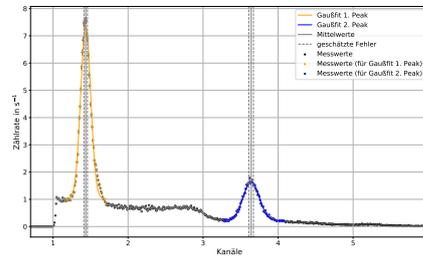
(a) Spektrum der Untergrundzählrate



(b) Spektrum der Zählrate von Co-60

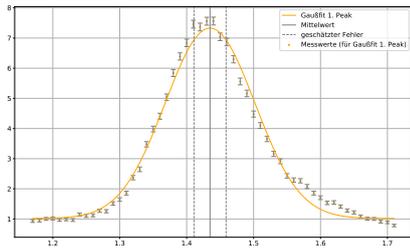


(c) Spektrum der Zählrate von Cs-137

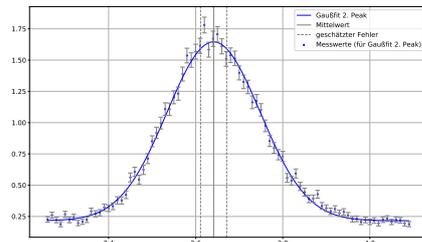


(d) Spektrum der Zählrate von Na-22.

Abbildung 8: Spektren der Zählrate für die bekannten Proben und die Untergrundzählrate. Die mit Gleichung (2) berechneten Fehler sind auch eingezeichnet. Um die Kanalnummern der in den Spektren erkennbaren Peaks zu bestimmen, wurde an die Daten im Bereich um die Peaks eine in Gleichung (3) beschriebene Gaußfunktionen angepasst. Die erhaltenen Kanalnummern der Peaks sind in grau eingezeichnet. Die Fehler auf die Kanalnummern wurden geschätzt, sie sind in grau gestrichelt eingetragen.

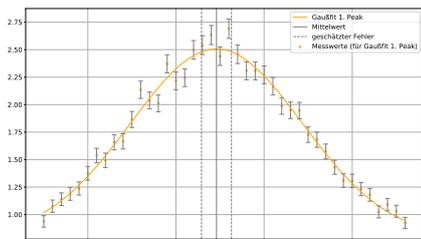


(a) Na-22: 1. Peak

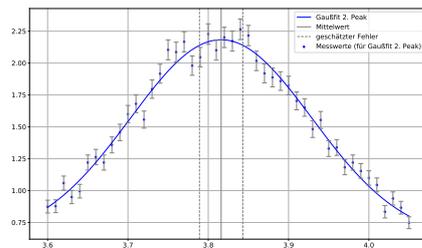


(b) Na-22: 2. Peak

Abbildung 9: Auftragung der Zählrate von Na-22 im Bereich der Peaks mitsamt Fehlern. Die an die Peaks angepasste Gaußfunktion der in Gleichung (3) beschriebenen Form ist auch eingezeichnet. Die aus der Anpassung erhaltenen Kanalnummern der Peaks sind in grau, die auf die Kanalnummern der Peaks geschätzten Fehler sind grau gestrichelt eingezeichnet.

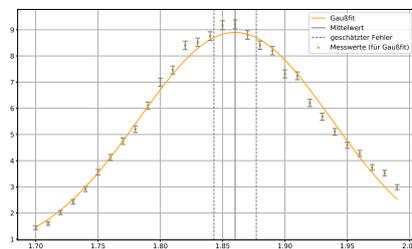


(a) Co-60: 1. Peak



(b) Co-60: 2. Peak

Abbildung 10: Auftragung der Zählrate von Co-60 im Bereich der Peaks mitsamt Fehlern. Die an die Peaks angepasste Gaußfunktion der in Gleichung (3) beschriebenen Form ist auch eingezeichnet. Die aus der Anpassung erhaltenen Kanalnummern der Peaks sind in grau, die auf die Kanalnummern der Peaks geschätzten Fehler sind grau gestrichelt eingezeichnet.



(a) Cs-137: Peak

Abbildung 11: Auftragung der Zählrate von Cs-137 im Bereich des Peaks mitsamt Fehlern. Die an den Peak angepasste Gaußfunktion der in Gleichung (3) beschriebenen Form ist auch eingezeichnet. Die aus der Anpassung erhaltene Kanalnummer des Peaks ist in grau, der auf die Kanalnummer des Peaks geschätzte Fehler ist grau gestrichelt eingezeichnet.

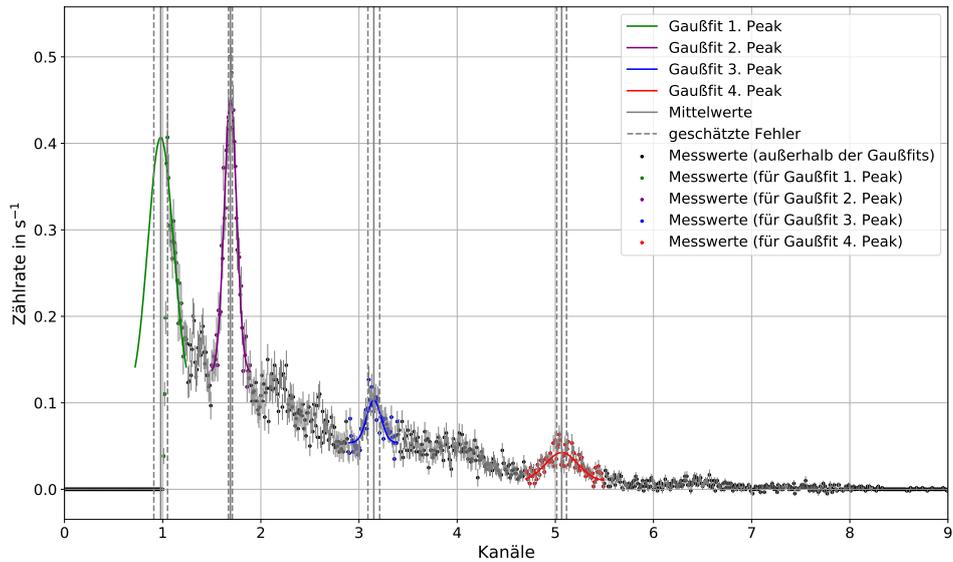
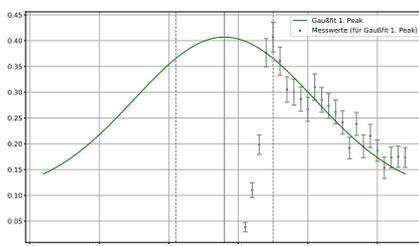
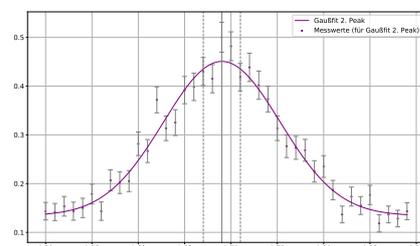


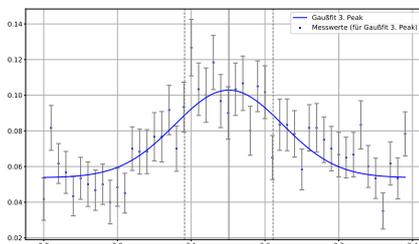
Abbildung 12: Spektrum der Zählrate der unbekannt Probe. Die Untergrundzählrate wurde abgezogen. Die mit Gleichung (9) berechneten Fehler sind mit eingezeichnet. Um die Kanalnummern der im Spektrum erkennbaren Peaks zu bestimmen, wurde an die Daten im Bereich um die Peaks eine in Gleichung (3) beschriebene Gaußfunktion angepasst. Die erhaltenen Kanalnummern sind in grau eingezeichnet. Die Fehler auf die Kanalnummern wurden geschätzt, sie sind in grau gestrichelt eingezeichnet.



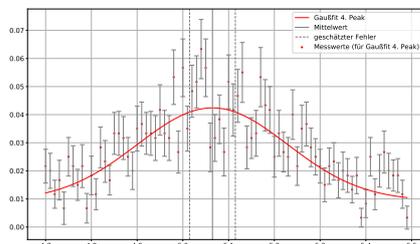
(a) Unbekannte Probe: 1. Peak



(b) Unbekannte Probe: 2. Peak



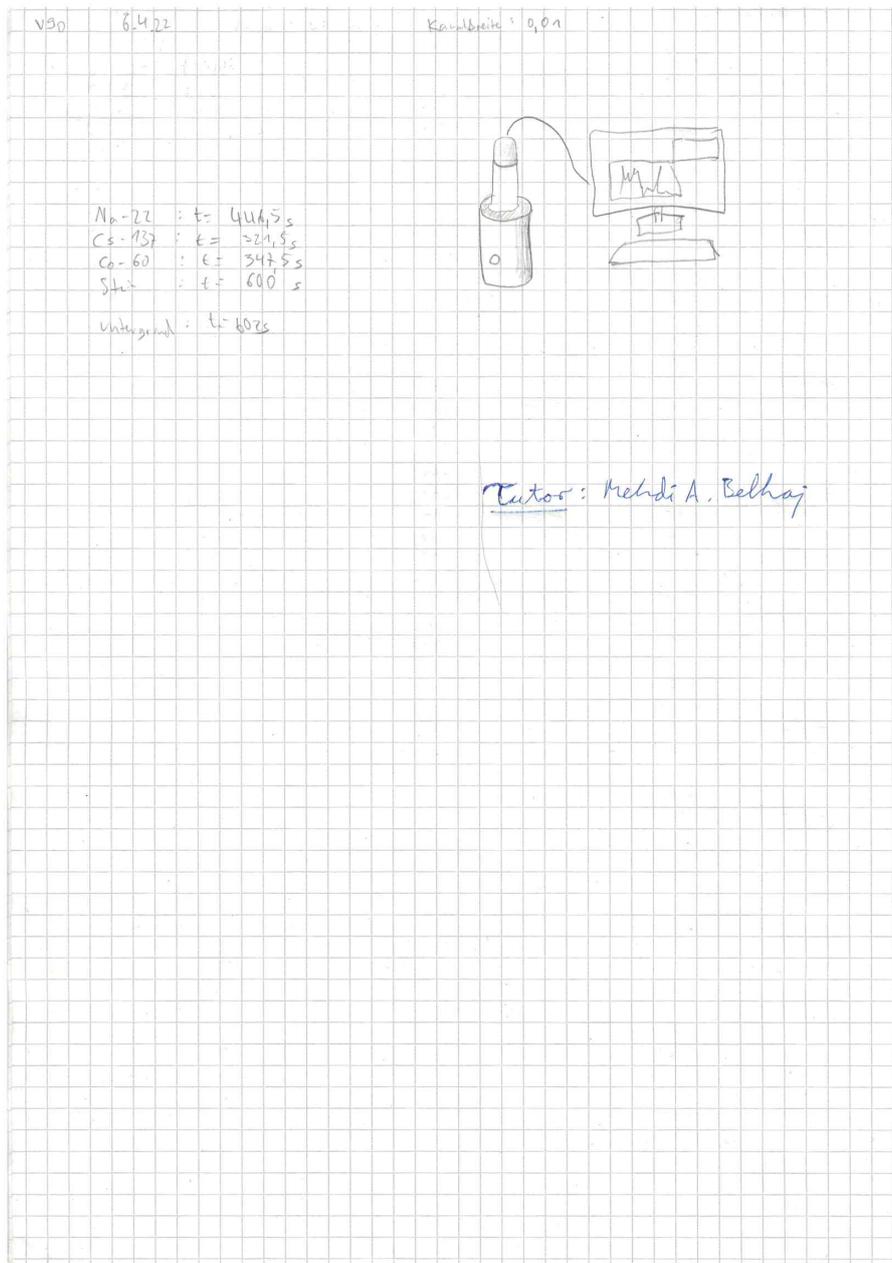
(c) Unbekannte Probe: 3. Peak



(d) Unbekannte Probe: 4. Peak

Abbildung 13: Auftragung der Zählrate der unbekannt Probe im Bereich der Peaks mitsamt Fehlern. Die an die Peaks angepasste Gaußfunktion der in Gleichung (3) beschriebenen Form ist auch eingezeichnet. Die aus der Anpassung erhaltenen Kanalnummern der Peaks sind in grau, die auf die Kanalnummern der Peaks geschätzten Fehler sind grau gestrichelt eingezeichnet.

## A.2 Rohdaten



## Literatur

- [1] M. Galan. *Table de Radionucléides*. LNE – LNHB/CEA. URL: [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Na-22\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Na-22_tables.pdf) (besucht am 08.04.2022).
- [2] *Physiklabor für Anfänger\*innen Teil 2, Anleitung Versuch 90, Gammaskopie*. Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 6. Apr. 2022.
- [3] *Physiklabor für Anfänger\*innen Teil 2, Aufbau Versuch 90*. Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 6. Apr. 2022. URL: <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/90>.
- [4] *Physiklabor für Anfänger\*innen Teil 2, Datenanalyse B*. Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 6. Apr. 2022.
- [5] Pamphile Roy. *scipy, least\_squares*. 2. Apr. 2021. URL: [https://github.com/scipy/scipy/blob/b5d8bab88af61d61de09641243848df63380a67f/scipy/optimize/\\_lsq/least\\_squares.py](https://github.com/scipy/scipy/blob/b5d8bab88af61d61de09641243848df63380a67f/scipy/optimize/_lsq/least_squares.py).
- [6] Gagandeep Singh. *scipy, minpack\_py*. 2. Nov. 2021. URL: [https://github.com/scipy/scipy/blob/b5d8bab88af61d61de09641243848df63380a67f/scipy/optimize/\\_minpack\\_py.py](https://github.com/scipy/scipy/blob/b5d8bab88af61d61de09641243848df63380a67f/scipy/optimize/_minpack_py.py).
- [7] Eite Tiesinga u. a. „CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2018“. In: (10. Jan. 2022). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0064853>. URL: [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=932441](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=932441).