

Inhaltsverzeichnis

1	Ziele des Versuchs	2
2	Aufbau und Durchführung	2
3	Auswertung und Fehleranalyse	3
3.1	Bestimmung der Untergrundstrahlung	3
3.2	Kalibrierung des Gammaspektrometers mit bekannten radioaktiven Quellen	5
3.3	Untersuchung der unbekannt Probe	9
4	Diskussion der Ergebnisse	11
4.1	Vergleich mit den Energien bekannter Nuklide	11
4.2	Angabe und Diskussion der Endergebnisse	12
4.3	Diskussion der verwendeten Messmethoden	13
4.4	Verbesserte Messmethoden	14
A	Anhang	15
	Abbildungsverzeichnis	15
	Tabellenverzeichnis	15
	Literaturverzeichnis	16
A.1	Rohdaten und daraus berechnete Größen	17
A.2	Messprotokoll	19

1 Ziele des Versuchs

In diesem Versuch werden verschiedene radioaktive Präparate untersucht. Hierzu wird zunächst ein Gammaskopie mit den bekannten radioaktiven Proben ^{60}Co , ^{137}Cs und ^{22}Na kalibriert. Daraufhin können die strahlenden Nuklide in einer unbekannt Probe bestimmt werden. Dies erlaubt zuletzt Rückschlüsse auf die Bestandteile der Probe.

2 Aufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau bestand aus einer Bleivorrichtung, in der radioaktive Proben platziert werden konnten und auf der eine höhenverstellbare Messapparatur angebracht war. Letztere bestand aus einem Detektor und einem Adapter. Bei dem Detektor handelte es sich um einen Szintillatorkristall aus mit Thallium-dotiertem Natriumiodid, in dem eintreffende γ -Quanten eine Kaskade von Ionisierungen auslösen, und einen Photomultiplier, der das vom Szintillator kommende Signal verstärkt. Am Adapter wurde Hochspannung über einen SHV-Eingang zu und das Signal über den BNC-Ausgang abgeführt. Beide Kabel führten über einen weiteren Adapter (*Gamma Spectacular: GS-2000-Pro*) mittels USB- und Soundkartenschnittstelle auf einen Computer. Mit Hilfe der Messsoftware *PRA* von *Gamma Spectacular* konnten dort Messergebnisse dargestellt und als Textdokument exportiert werden. Für die Messung standen die bekannten radioaktiven Proben ^{60}Co , ^{137}Cs und ^{22}Na , sowie eine weitere Probe (Pechblende), bei welcher die strahlenden Nuklide nicht bekannt waren, zur Verfügung. Der Versuchsaufbau ist in [Abbildung 1](#) skizziert.

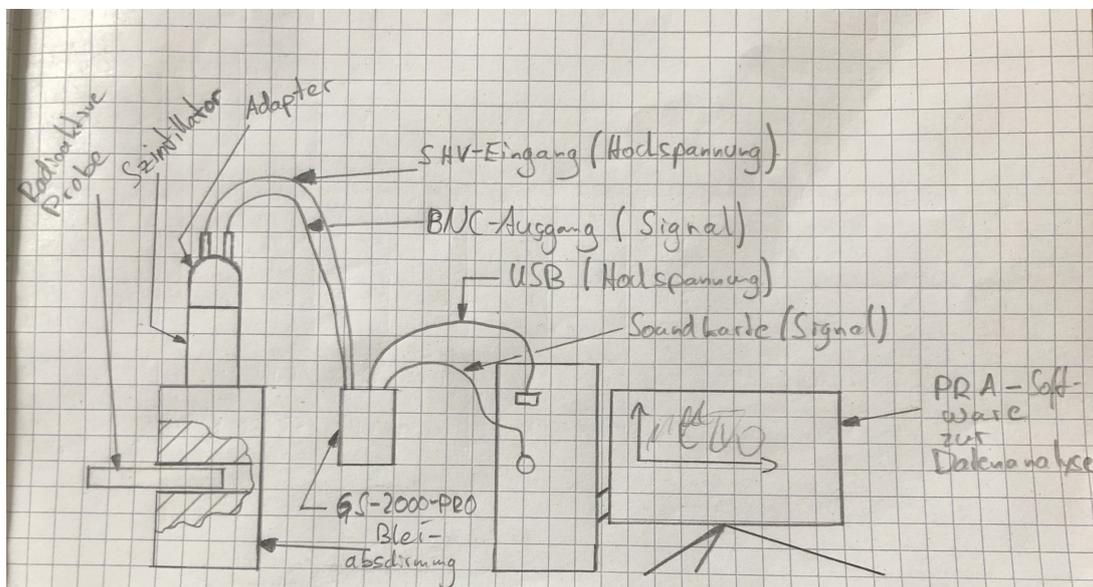


Abbildung 1: Dargestellt ist der Versuchsaufbau. In der Bleivorrichtung konnten radioaktive Proben platziert werden. Die höhenverstellbare Messapparatur war mit einem Computer verbunden, auf welchem die detektierten Ereignisse in den einzelnen Kanälen dargestellt und gezählt werden konnten.

Jede Messung wurde nach dem selben Prinzip durchgeführt. Wenn nicht anders angegeben, befand sich die Messapparatur am unteren Anschlag der Bleivorrichtung. Die Messzeit betrug 10 min, welche vom Messprogramm gestoppt und deshalb als exakt angenommen wurde. In diesem Zeitraum wurden die ankommenden γ -Quanten für verschiedene Kanäle detektiert. Im Gegensatz zu einem Geiger-Müller-Zählrohr ist der verwendete Szintillatordetektor dazu in der Lage, die Energie ankommender γ -Quanten als Ausgangsspannung

$$U_A \propto h\nu_\gamma \quad (1)$$

darzustellen und zu unterscheiden. Die Zuordnung der detektierten Ereignisse $N(k)$ in die jeweiligen Kanäle k erfolgt in Abhängigkeit ebendieser Ausgangsspannung. Jedem Kanal wird dabei ein Spannungsintervall U'_A zugeordnet.

Vorbereitend auf die eigentlichen Messungen wurde ein Untergrundspektrum aufgenommen. Dabei befand sich keine radioaktive Probe in der Bleivorrichtung. Mit dessen Hilfe können alle weiteren Messreihen von der Untergrundstrahlung bereinigt werden.

Zunächst sollte das Gammaskopie kalibriert werden. Hierfür wurden drei analoge Messreihen durchgeführt. Für jede der Messreihen wurde eine der bekannten radioaktiven Proben (^{60}Co , ^{137}Cs bzw. ^{22}Na), die sich in stiftartigen Halterungen befanden, durch eine horizontale Bohrung im Inneren der Bleiabschirmung platziert. Die Proben wurden so weit eingeführt, bis ein deutliches Signal des jeweiligen Strahlers detektiert werden konnte. Für jede der Proben sind die charakteristischen Übergänge und deren Energien bekannt. Mit den Positionen der Peaks lässt sich also das Spektrometer kalibrieren, indem den betroffenen Kanälen die entsprechenden Energien mit Hilfe einer Regression zugeordnet werden.

Daraufhin wurde das Spektrum der Pechblende vermessen. Diese wurde von oben in die Bleivorrichtung gelegt, die Messapparatur musste aufgrund der Größe des Steins etwas über dem Anschlag angebracht werden. Aus den Daten können mit Hilfe der Kalibrierung Rückschlüsse auf die Energien der detektierten γ -Quanten getätigt werden. Durch Vergleich mit bekannten Energien einiger Nuklide, können dann mögliche Bestandteile der Pechblende ermittelt werden.

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Bestimmung der Untergrundstrahlung

Zunächst wird die Untergrundstrahlung untersucht, um diese von der Strahlung der Proben unterscheiden zu können. Hierfür wurde wie beschrieben eine Messreihe über $t = 10$ min ohne radioaktive Probe aufgenommen, während sich die Messapparatur am Anschlag im Bleiblock befand. Die statistische Unsicherheit der gemessenen Ereignisse n berechnet sich aus \sqrt{n} . Die Unsicherheit der Kanalnummer war nicht angegeben, es wird also angenommen, dass die ankommenden γ -Quanten den einzelnen Kanälen eindeutig zugeordnet wurden.

Für alle in diesem Versuch gemessenen Ereignisse wird die Zählrate

$$R = \frac{n}{t} \quad (2)$$

berechnet. Hierbei ergibt sich die Unsicherheit

$$\Delta R = \frac{\Delta n}{t} \quad (3)$$

durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung, wobei diese nur von der statistischen Unsicherheit der gemessenen Ereignisse abhängt, da die Messzeit als exakt angenommen wird.

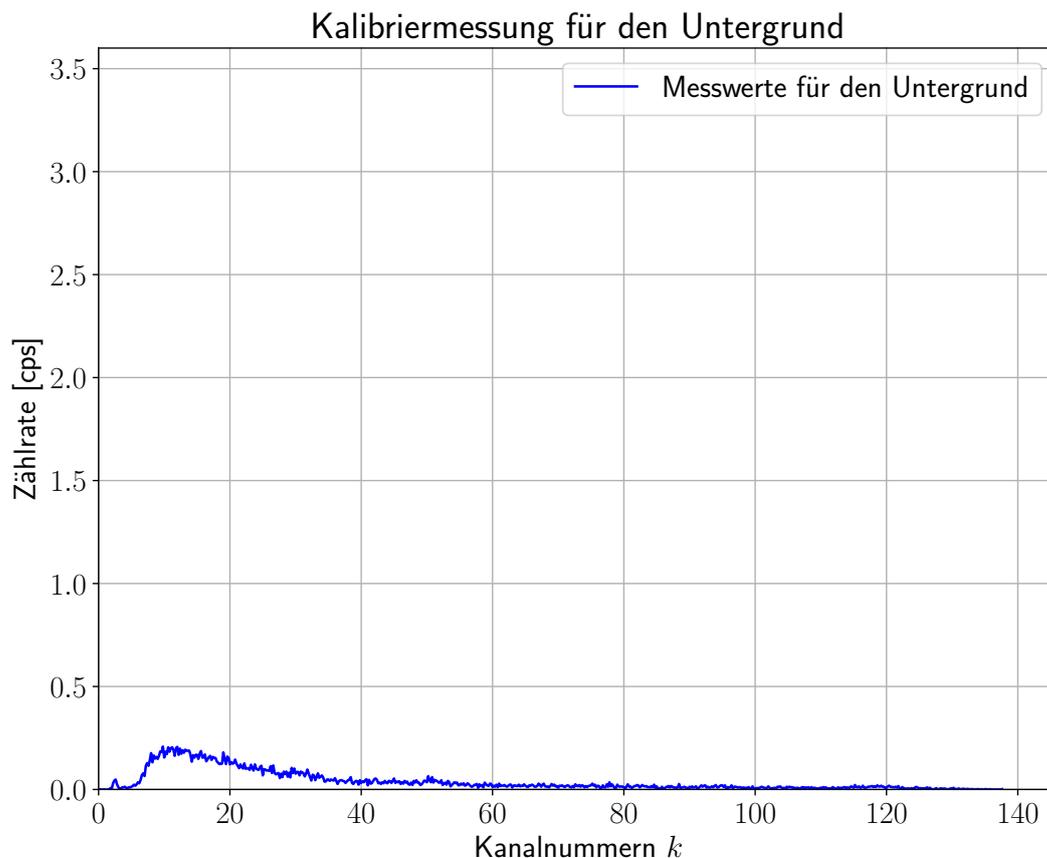


Abbildung 2: Untergrundspektrum des Gammaskopiers. Aufgetragen sind die Zählraten gegen die Kanalnummer k . Die Unsicherheiten der einzelnen Werte sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet.

Die Zählraten des Untergrundspektrums sind für die einzelnen Kanäle in [Abbildung 2](#) aufgetragen. Die y-Achseinteilung ist hierbei so groß gewählt, damit ein qualitativer Vergleich der Zählraten auf den ersten Blick mit allen weiteren Aufträgen dieses Protokolls möglich ist. Aus einem solchen Vergleich zwischen den Abbildungen können aber nicht ohne weiteres Rückschlüsse darauf gezogen werden, welcher Strahler quantitativ insgesamt mehr strahlt, denn hier spielen auch die Position des Strahlers in der Apparatur und vor allem die Anzahl der Nuklide eine Rolle. Hierauf wird in der Diskussion genauer eingegangen. Die hier dargestellte Untergrundstrahlung ist aber für jeden Strahler im Rahmen der statistischen Unsicherheiten gleich.

Es ist ein kontinuierliches Spektrum erkennbar, welches für kleine Kanalnummern ein Maximum aufweist und daraufhin kontinuierlich abfällt. Es existieren keine auffallenden Peaks, die Rückschlüsse auf bestimmte Nuklide in der Umgebung zulassen würden. Für alle folgenden Versuchsteile wird dieses Spektrum von den dort erhaltenen Spektren abgezogen. Dabei wird für jeden Kanal der Messung i die vom Untergrund bereinigte Intensität

$$R'_i = R_i - R_u \quad (4)$$

berechnet. Die Unsicherheit

$$\Delta R'_i = \sqrt{\Delta R_i^2 + \Delta R_u^2} \quad (5)$$

ergibt sich durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung.

3.2 Kalibrierung des Gammaskopiers mit bekannten radioaktiven Quellen

Um mit dem Gammaskopier Rückschlüsse auf die in einem unbekanntem Präparat vorliegenden Nuklide zu ziehen, muss dieses in Versuchsteil 1 zunächst kalibriert werden. Hierfür wurden, wie oben beschrieben, in jeweils $t = 10$ min langen Messungen die Spektren dreier Kalibrierquellen, die von ^{60}Co , ^{137}Cs und ^{22}Na , aufgenommen. Aus den Messwerten der Ereignisse n lassen sich die Zählraten wieder über Gleichung (2) mitsamt den Unsicherheiten nach Gleichung (3) berechnen. Die Unsicherheit der gezählten Ereignisse n (in counts) wird dabei wie oben als $\Delta n = \sqrt{n}$ und die Zeitmessung t als exakt, da sie über das Computerprogramm erfolgte, angenommen.

Die direkt aus dem Messprogramm exportierten Spektren sind in Abbildung 6 im Anhang dargestellt.

Berücksichtigt man die zuvor gemessene Untergrundstrahlung in Abbildung 2, so lassen sich die gemessenen Spektren durch Gleichung (4) bereinigen, wobei die Unsicherheiten der bereinigten Zählraten nach Gleichung (5) gegeben sind. In Abbildung 3 sind die um das Untergrundspektrum bereinigten Spektren der bekannten Präparate sichtbar.

In den Spektren von ^{60}Co und ^{22}Na sind dabei zwei eindeutige Peaks zu erkennen, während das Spektrum von ^{137}Cs einen Peak aufweist. Zu diesen Peaks sollen die entsprechenden Kanalnummern bestimmt werden. Da bei den Peaks näherungsweise von Gauß-Kurven ausgegangen werden kann, wird zur Ermittlung der Kanalnummern jeweils eine Gauß-Anpassung an den Intensitätsverlauf durchgeführt. Für die Anpassung werden dabei jeweils nur Werte in noch deutlich sichtbar zu den Peaks gehörenden Bereichen verwendet, sodass in diesen Bereichen weder Plateaus noch Überschneidungen mit Anstiegen anderer Peaks vorliegen. Die Gauß-Anpassungen der Form

$$R(k) = a \cdot \exp\left(-\frac{(k - k_{\max})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

erfolgen dabei numerisch durch gewichtete χ^2 -Minimierung nach den in [1] gegebenen Formeln und sind ebenfalls in Abbildung 3 sichtbar.

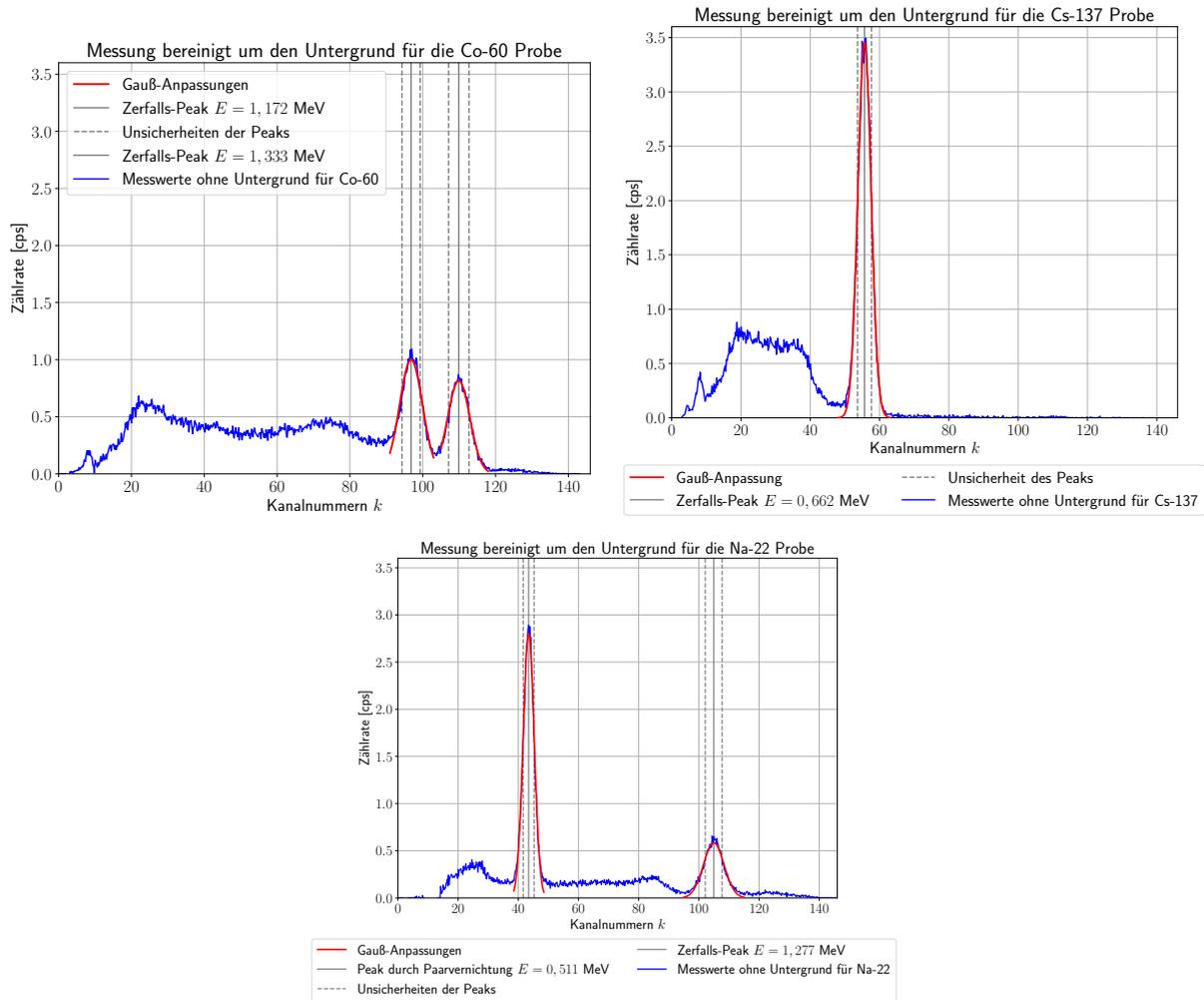


Abbildung 3: Sichtbar sind die aus den Messwerten erhaltenen Spektren der drei bekannten radioaktiven Quellen ^{60}Co , ^{137}Cs und ^{22}Na , bereinigt um das in [Abbildung 2](#) sichtbare Untergrundspektrum. Dabei sind die Zählraten mitsamt Unsicherheiten nach [Gleichung \(4\)](#) und [Gleichung \(5\)](#) berechnet und gegen die Kanalnummern aufgetragen. Zur Kalibrierung des Spektrums sind außerdem die Gauß-Anpassungen der einzelnen Peaks sichtbar, deren Parameter-Bestwerte [Tabelle 3](#) zu entnehmen sind, aus denen die ebenfalls in dieser Tabelle gegebenen Kanalnummern der entsprechenden Peaks ermittelt werden. Auch sichtbar sind die grafisch geschätzten Unsicherheiten auf die Peak-Positionen.

Die durch die Anpassung bestimmten Bestwerte und deren Unsicherheiten für die Parameter a , k_{max} und σ sind für jede der drei bekannten radioaktiven Quellen zusammen mit den entsprechenden Anpassungsgüten in Form eines reduzierten χ^2 -Tests, [Tabelle 3](#) zu entnehmen.

Da die Peaks jedoch nur näherungsweise durch Gauß-Kurven beschrieben werden können, werden die Unsicherheiten der bestimmten Kanalnummern für die jeweiligen Peaks zusätzlich durch grafische Abschätzung bestimmt. Im Folgenden wird nur mit diesen Unsicherheiten weitergerechnet. Die grafische Abschätzung der Unsicherheiten ist dabei ebenfalls in [Abbildung 3](#) sichtbar und die Werte für die Unsicherheiten Δk_{max} sind [Tabelle 1](#) zu entnehmen.

Die so bestimmten Kanalnummern gehören gerade zu den Peaks der Spektren, denen sich bekannte Übergänge beim Zerfall der vorliegenden Präparate, wie in [2] auf Seite 2 gegeben, zuordnen lassen.

Bei ^{60}Co entspricht der weiter links auftretende Peak einem Übergang mit einer Energie von $E = 1172 \text{ keV}$ der abgegebenen γ -Strahlung, der rechte Peak entspricht dem Übergang mit $E = 1333 \text{ keV}$.

Analog entspricht der einzige im Spektrum von ^{137}Cs sichtbare Peak gerade dem Übergang mit $E = 662 \text{ keV}$.

Das Spektrum von ^{22}Na weist im Gegensatz zu den Erwartungen eines einzigen Peaks nach der in [2] sichtbaren Zerfallskette zwei sichtbare Peaks auf. Während der weiter rechts im Spektrum auftretende Peak dem erwarteten Übergang mit $E = 1277 \text{ keV}$ zuzuordnen ist, handelt es sich bei dem weiter links liegenden Peak deutlich höherer Intensität um eine durch den β^+ Zerfall von ^{22}Na zustande kommende γ -Strahlung. Durch die Paarvernichtung zwischen Elektronen und den vom β^+ Zerfall stammenden Positronen ergibt sich ein Peak, dessen Kanalnummer nach [3] eine Energie von $E = 511 \text{ keV}$ zugeordnet werden kann, welche genau der Ruheenergie eines Elektrons entspricht.

Zur Übersichtlichkeit sind die Zuordnungen der bekannten Energien zu den aus den Gauß-Anpassungen bestimmten Kanalnummern der einzelnen Peaks nochmals [Tabelle 1](#) zu entnehmen.

Strahler	$k_{\max} \pm \Delta k_{\max}$	E [keV]
^{60}Co	$96,8 \pm 2,5$	1172
^{60}Co	$109,9 \pm 2,8$	1333
^{137}Cs	$55,7 \pm 2,0$	662
^{22}Na	$43,4 \pm 1,8$	511
^{22}Na	$104,9 \pm 2,8$	1277

Tabelle 1: Sichtbar sind die aus den Gauß-Anpassungen in [Abbildung 3](#) berechneten Kanalnummern k_{\max} der in den Spektren von ^{60}Co , ^{137}Cs und ^{22}Na vorliegenden Peaks, die ebenfalls [Tabelle 3](#) zu entnehmen sind, dieses mal allerdings mit den grafisch geschätzten Unsicherheiten Δk_{\max} für die Peak-Positionen. Außerdem zu sehen ist die Zuordnung der Peaks zu den nach [2] bekannten Energien E der Übergänge.

Aus den zu den bekannten Energien gehörenden Kanalnummern kann nun das Gammaskopie kalibriert werden. Hierzu werden die Kanalnummern k , um deren Unsicherheiten bei Anpassungen zu berücksichtigen, gegen die zugehörigen Energien E aufgetragen werden. Es werden dabei die grafisch geschätzten Unsicherheiten der Peaks verwendet. Die Auftragung ist in [Abbildung 4](#) sichtbar.

Kanalnummern der Peaks für die bekannten Zerfalls-Energien zur Kalibrierung

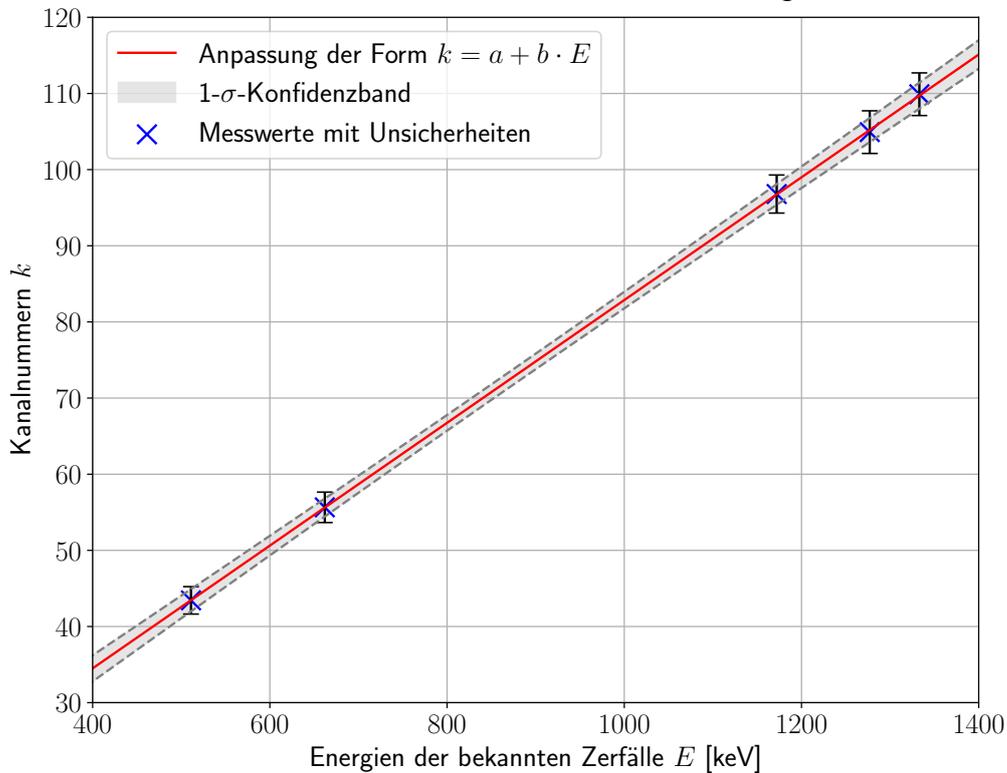


Abbildung 4: Sichtbar sind die aus den bekannten Spektren ermittelten Kanalnummern k_{\max} aus [Tabelle 1](#) mitsamt ihren Unsicherheiten gegen die Energien E bekannter Übergänge nach [\[2\]](#) von ^{60}Co , ^{137}Cs und ^{22}Na . Außerdem sichtbar ist die aus den Werten durch gewichtete lineare Regression erhaltene Anpassung in [Gleichung \(7\)](#) mitsamt $1\text{-}\sigma$ -Konfidenzband. Mit dieser Anpassung kann das Gammaskopie kalibriert und bei unbekanntem Proben von den Kanalnummern auf die Energien der auftretenden Übergänge geschlossen werden.

Mit Hilfe einer gewichteten linearen Regression nach den in [\[1\]](#) [auf Seite 13](#) gegebenen Formeln ergibt sich für eine lineare Anpassung der Form $y = a + bx$ der Zusammenhang

$$k = a + b \cdot E \quad (7)$$

mit

$$a = (2 \pm 3) \quad (7a)$$

$$b = (81 \pm 3) \text{ MeV}^{-1} . \quad (7b)$$

Diese Anpassung ist mitsamt dem $1\text{-}\sigma$ -Konfidenzband ebenfalls in [Abbildung 4](#) zu finden. Ein reduzierter χ^2 -Test ergibt $\chi^2_{\nu} = 0,005$, die Anpassung ist also sehr gut verträglich mit den Werten und beschreibt gut den Zusammenhang zwischen Kanalnummern und Energien. Mit Hilfe dieses Zusammenhangs kann später bei Präparaten mit unbekanntem Nuklid aus den ermittelten Kanalnummern auf die entsprechenden Energien geschlossen werden.

Um eine mögliche Korrelation der beiden Parameter a und b zu untersuchen, wird der Korrelationskoeffizient nach den in [1] auf Seite 5 gegebenen Formeln bestimmt. Er ergibt sich zu

$$\rho_{a,b} = -0,93,$$

womit die beiden Parameter a und b also deutlich korreliert sind. Führt man die Regression durch, so muss bei größerer Steigung b der Ausgleichsgerade also der y -Achsenabschnitt a kleiner werden und umgekehrt.

3.3 Untersuchung der unbekannt Probe

Nun kann das Spektrum eines unbekannt Strahlers untersucht werden. Als Präparat wurde hierfür Pechblende genutzt. Um das Präparat in die Messapparatur zu legen, musste diese leicht angehoben werden. Aufgrund der Größe der Probe konnte sie danach nicht mehr in ihre ursprüngliche Position zurückgesetzt werden. Die Messung wurde daher in einer leicht anderen Höhe als zuvor durchgeführt. Mögliche dadurch entstehende Unsicherheiten werden in der Diskussion genauer betrachtet.

Abermals wurde die Messung bei ansonsten gleichen Einstellungen über einen Zeitraum von 10 min durchgeführt.

Um das reine Spektrum der Probe zu erhalten, wurde das aufgenommene Spektrum nach Gleichung (4) um das Untergrundspektrum bereinigt. Die Unsicherheiten der Messwerte ergeben sich abermals nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung der statistischen Unsicherheiten der Messwerte und des Untergrunds, wie in Gleichung (5).

Das so ermittelte Spektrum ist in Abbildung 5 sichtbar.

Aufgetragen wurde es diesmal nicht gegen die Kanalnummer k , sondern direkt gegen die zugehörige Energie E in keV. Die Umrechnung erfolgte mit Hilfe der linearen Regression in Gleichung (7) zur Kalibrierung.

In dem so erhaltenen Spektrum sind deutlich mehrere Peaks zu erkennen, die auf verschiedene Zerfälle zurückzuführen sind.

Um diese genauer zu bestimmen, wurden wie zuvor, Gauß-Anpassungen nach Gleichung (6) mit Hilfe von gewichteter, numerischer χ^2 -Minimierung durchgeführt. Die Ergebnisse der Parameter-Bestwerte sind, zusammen mit den jeweiligen reduzierten χ^2 -Tests in Tabelle 4 im Anhang aufgetragen. Aus den Bestwerten wurden die Positionen der Maxima bestimmt, die später mit den Energien verschiedener, bekannter Zerfälle abgeglichen werden können. Die Unsicherheiten Δk auf die entsprechenden Kanalnummern wurden zunächst aus der Breite der Peaks abgeschätzt. Zusammen mit den systematischen Unsicherheiten, die sich aus den Unsicherheiten der Parameter-Bestwerte aus der Kalibrierung ergeben, berechnen sich die systematischen und statistischen Unsicherheiten der Peaks mit

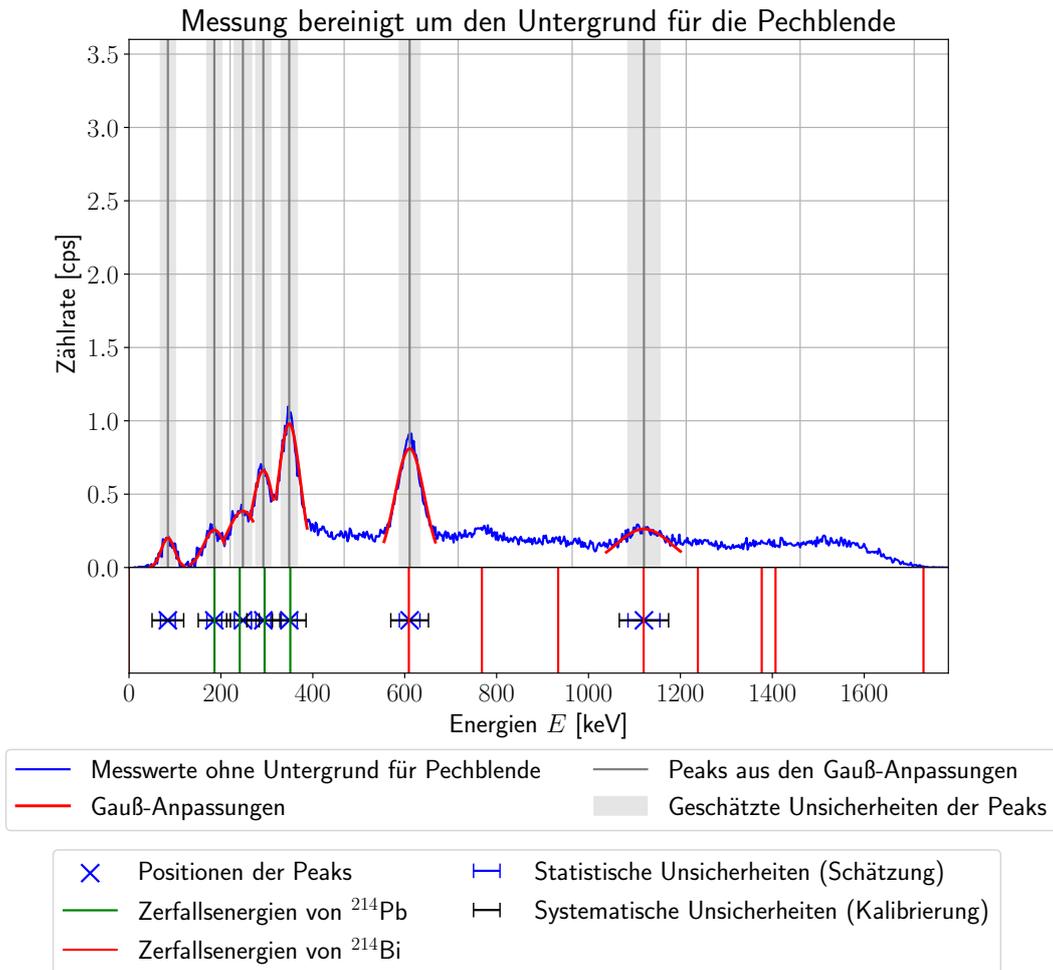


Abbildung 5: Darstellung des gemessenen Spektrums der Pechblende, nach Abzug des Untergrundspektrums gegen die jeweilige Energie. Die Umrechnung zwischen der ursprünglich gemessenen Kanalnummer und den dargestellten Energien erfolgt nach Gleichung (7). Nach Gleichung (6) wurden mit Hilfe von gewichteter, numerischer χ^2 -Minimierung Gauß-Anpassungen für die sichtbaren Peaks durchgeführt. Die reduzierten χ^2 -Tests liegen im Bereich von 1,2 bis 3,0. Die Abweichungen sind dabei auf Rauschen in der Messreihe zurückzuführen. Ebenfalls sichtbar sind die so bestimmten Maxima mit ihren geschätzten Unsicherheiten. Darunter sind die Positionen der Maxima nochmals zusammen mit ihren statistischen und systematischen Unsicherheiten nach Gleichung (8) aufgetragen. Auch sind die Energien der Zerfälle von ^{214}Pb und ^{214}Bi als Linien dargestellt. Man sieht, dass diese sehr gut mit den Positionen der Peaks übereinstimmen. In Tabelle 2 sind die Werte mit ihren Unsicherheiten und t-Tests nochmals aufgelistet.

$$E_P = \frac{(k - a)}{b}$$

$$\Delta E_P^{\text{syst.}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{b}\right)^2 + \left(\frac{k - a}{b^2} \Delta b\right)^2} \tag{8}$$

$$\Delta E_P^{\text{stat.}} = \left| \frac{\Delta k}{b} \right| .$$

Die so ermittelten Positionen der Maxima sind mit beiden Unsicherheiten in [Abbildung 5](#) im unteren Diagramm dargestellt und nochmals in [Tabelle 2](#) zu finden.

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Vergleich mit den Energien bekannter Nuklide

Um Rückschlüsse auf die Nuklide im Präparat zu ziehen, können die Energien der Peaks mit den Energien verschiedener, bekannter Nuklide nach [\[4\]](#) verglichen werden. Aufgrund der großen Unsicherheiten der Peak-Energien, kommen für die meisten Peaks mehrere Nuklide in Frage. Um die Auswahl einzugrenzen, werden jeweils die Nuklide mit dem kleinsten t-Test mit dem berechneten Wert betrachtet.

Die ermittelten Energien der Peaks, sowie ihre Unsicherheiten, die wahrscheinlichsten Nuklide und die dazugehörigen t-Tests sind in [Tabelle 2](#) zu finden.

E_P [keV]	$\Delta E_P^{\text{syst.}}$ [keV]	$\Delta E_P^{\text{stat.}}$ [keV]	$E(^{214}\text{Pb})$ [keV]	$E(^{214}\text{Bi})$ [keV]	t-Tests
85	34	16	/	/	/
186	35	16	186	/	0,007
248	36	18	241	/	0,128
292	36	16	295	/	0,050
349	37	17	351	/	0,042
610	40	20	/	609	0,031
/	/	/	/	768	/
/	/	/	/	934	/
1120	50	40	/	1120	0,012
/	/	/	/	1238	/
/	/	/	/	1377	/
/	/	/	/	1407	/
/	/	/	/	1729	/

Tabelle 2: Auflistung der aus Gauß-Anpassungen ermittelten Peak-Energien E_P für die Pechblende. Die Anpassungen erfolgten nach [Gleichung \(6\)](#) und nach Bereinigung des Spektrums um das Untergrundspektrum. Zum Vergleich sind die Zerfallsenergien von ^{214}Pb und ^{214}Bi , sowie die dazugehörigen t-Tests aufgelistet. Es ist deutlich sichtbar, dass die gemessenen Peaks sehr gut mit den Zerfällen von ^{214}Pb und ^{214}Bi übereinstimmen.

Aufgrund seiner geringen Energie, konnte für den ersten Peak mit $(85 \pm (34 \text{ syst.} + 16 \text{ stat.})) \text{ keV}$ in [\[4\]](#) kein passendes Nuklid ermittelt werden. Nach weiterer Recherche, wurden in [\[7\]](#) zwei für diese Energie charakteristische Nuklide gefunden. Der Peak könnte durch den $K_{\beta 1}$ -Zerfall von Blei ($E(\text{Pb-}K_{\beta 1}) = 84,94 \text{ keV}$) entstanden sein, oder durch den Zerfall von ^{228}Th ($E(^{228}\text{Th}) = 84,37 \text{ keV}$). Die t-Tests mit den beiden Energien ergeben 0,007, bzw. 0,004. Dies deutet stark darauf hin, dass diese Zerfälle den Peak verursacht haben könnten. Aufgrund der großen Unsicherheiten, lassen sich aber andere Nuklide nicht ausschließen.

Beide Zerfälle kommen in der Zerfallsreihe von ^{232}Th vor. Der Peak ist also ein Indiz dafür, dass die Probe ^{232}Th enthalten könnte.

Die Energien aller vier nächsten Peaks weisen nach [4] stark auf das Vorhandensein von ^{214}Pb hin. Die ermittelten Energien liegen sehr nahe an den Literaturwerten und die t-Tests aus [Tabelle 2](#) weisen auf große Verträglichkeiten der Werte hin. Es ist also stark von ^{214}Pb in der Probe auszugehen.

Die Energie der letzten beiden Peaks passen sehr gut zu den Zerfallsenergien von ^{214}Bi . Abermals weisen die t-Tests auf eine sehr gute Verträglichkeit hin. ^{214}Bi hat noch weitere Peaks bei verschiedenen Energien, die ebenfalls in [Abbildung 5](#) und [Tabelle 2](#) zu finden sind, im Spektrum der Probe aber kaum nachweisbar sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nach [4] die Intensitäten dieser Peaks im Vergleich zu den anderen beiden eher gering sind. Diese Peaks sind also ein Indiz für ^{214}Bi in der Pechblende.

^{214}Pb und ^{214}Bi sind beides Nuklide, die in der Zerfallsreihe von ^{238}U auftreten. Nach dieser Auswertung ist also sehr stark davon auszugehen, dass sich ^{238}U und dessen Zerfallsprodukte in der Pechblende befanden. Diese Beobachtung ist in Übereinstimmung mit [9]. Hier wird ebenfalls von Uranvorkommen in Pechblende berichtet, weshalb diese auch Uraninit genannt wird.

4.2 Angabe und Diskussion der Endergebnisse

Mit Hilfe der bekannten radioaktiven Quellen konnte das Gammaskopie kalibriert werden. Der Zusammenhang zwischen Kanalnummer und detektierter Energie wird zu

$$k = a + b \cdot E$$

mit

$$\begin{aligned} a &= (2 \pm 3) & \frac{\Delta a}{a} &= 150 \% \\ b &= (81 \pm 3) \text{ MeV}^{-1} & \frac{\Delta b}{b} &= 4 \% \end{aligned}$$

angegeben. Der reduzierte χ^2 -Test von $\chi^2_{\nu} = 0,005$ bestätigt damit den linearen Zusammenhang zwischen Kanalnummer und Energie. Die zugrundeliegenden Werte sind [Tabelle 1](#) zu entnehmen.

Mit dem kalibrierten Spektrometer wurde die Pechblende untersucht. Die dabei ermittelten Peakenergien sind in [Tabelle 2](#) aufgelistet. Dort findet sich auch der Vergleich mit den Energien möglicher Nuklide. Dabei wurde sich auf die Nuklide beschränkt, die den kleinsten t-Test aufwiesen. Dadurch lässt sich sagen, dass sehr wahrscheinlich ^{214}Pb und ^{214}Bi in der Pechblende enthalten sind, denn die t-Tests mit deren Zerfallsketten liegen alle bei $t \leq 0,128$ und weisen damit auf eine sehr gute Verträglichkeit hin. Da beide Nuklide in der Zerfallsreihe von ^{238}U auftreten, wird stark davon ausgegangen, dass ^{238}U und entsprechende Zerfallsprodukte in der verwendeten Pechblende enthalten sind. Ein Vergleich mit [9] zeigt, dass dieses Ergebnis im Einklang mit der Erwartung ist, dass Uran in Pechblende vorkommt.

4.3 Diskussion der verwendeten Messmethoden

Um die Pechblende zu vermessen, musste die Messapparatur abgenommen und im Gegensatz zu allen anderen Messungen nicht bis zum Anschlag, sondern ein bisschen höher eingestellt werden. Relevant ist hierbei, dass die Untergrundstrahlung bei dieser Einstellung womöglich leicht anders war als zuvor. Sie war vermutlich höher, da die Messapparatur nicht so tief in der Bleivorrichtung steckte. Da hierfür aber keine Referenzmessung gemacht wurde, wurde dieses Spektrum dennoch mit dem ursprünglichen Untergrundspektrum bereinigt. Diese Unsicherheit beeinflusst hauptsächlich die gemessenen Intensitäten. Auch die Peakpositionen könnten dadurch im Vergleich zur Kalibrierung verfälscht worden sein.

Durch die Darstellungen in diesem Protokoll könnte der Eindruck entstehen, dass die Intensitäten der einzelnen Proben untereinander quantitativ exakt verglichen werden könnten. Obwohl natürlich gut begründete Tendenzen herauszulesen sind, ist ein solcher Vergleich ohne weiteres nicht möglich. Für die Pechblende wurde dies im vorherigen Absatz bereits diskutiert. Auch die anderen Proben sind nicht exakt vergleichbar. Diese wurden zwar immer gleich in der Bleivorrichtung ausgerichtet, sodass möglichst viel Strahlung detektiert wurde, doch erfolgte dies nicht exakt. Außerdem ist nicht bekannt, wie weit die strahlenden Nuklide in deren stiftartigen Halterungen steckten und um welche Menge es sich jeweils handelte. Auch das Alter und die Halbwertszeiten der Proben unterscheiden sich. Dennoch ist ein grober Vergleich an dieser Stelle gut möglich.

Obwohl die Messungen um die Untergrundstrahlung bereinigt wurden, waren nicht nur scharfe Peaks, sondern auch kontinuierliche Spektren erkennbar. Vor allem für kleine Energien bis zur Compton-Kante handelt es sich hierbei nicht um zu verbessernde Fehler. Der Comptoneffekt sorgt für die Emission von γ -Strahlung, deren Energie vom Streuwinkel abhängt. Hierdurch entsteht das sogenannte Comptonkontinuum, das in [Abbildung 3](#) gut sichtbar ist. Die Messwerte können nur schwierig von diesem bereinigt werden.

Die statistischen Unsicherheiten der gemessenen Intensitäten sind direkt auf die Anzahl der detektierten Counts zurückzuführen. Längere Messzeiten ergeben hierbei kleinere Unsicherheiten, da mehr Counts detektiert werden. Dass die Unsicherheiten trotz der langen Messzeiten hoch sind liegt daran, dass die gemessenen Counts pro Kanal aufgrund der geringen Kanalbreite vergleichsweise klein sind. Mit längeren Messzeiten ließe sich diese Unsicherheit verringern.

Des Weiteren ist die Untergrundstrahlung im Praktikumsgebäude hoch. Zusätzlich zur Strahlung vom Gebäude und der Umgebung befinden sich hier auch viele radioaktive Proben. Umso erstaunlicher ist es, dass der Bleiblock die γ -Strahlung recht gut abzuschirmen scheint. Die Spektren der Proben waren ohne weiteres erkennbar.

Leider war nicht bekannt, welche Zählraten die Messapparatur noch detektieren kann. Der Szintillationszähler hat eine hier unbeachtete Totzeit im Bereich von 10^{-6} s. Wird eine entsprechend hohe Zählrate detektiert, so kann der Zähler die einzelnen Ereignisse nicht mehr voneinander unterscheiden und die Messung wird unbrauchbar. Da hierzu aber keine weiteren Hinweise gegeben wurden wird davon ausgegangen, dass die Totzeit, welche deutlich geringer ist als die eines Geiger-Müller-Zählrohrs, für die vorliegenden Messungen keinen Einfluss hatte.

4.4 Verbesserte Messmethoden

Wenn dieser Versuch erneut durchgeführt wird, sollten alle Messungen mit der gleichen Detektorhöhe erfolgen. Im Zweifel erhöht sich zwar das Untergrundspektrum für alle Messungen, die dadurch mit höherem Detektor als zuvor vermessen werden, dieses lässt sich aber leicht wieder abziehen. Dadurch ergibt sich eine höhere Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen.

Um exakter zu messen, könnten außerdem deutlich längere Messreihen durchgeführt werden. Damit verringert sich die relative Unsicherheit der Intensitäten in den einzelnen Kanälen stark. Hiermit können auch exaktere Endergebnisse angegeben und belastbarere Aussagen über die strahlenden Nuklide der Pechblende getroffen werden.

Alternativ kann man sich überlegen, größere Mengen der Strahlungsquellen zu verwenden. Damit würden die Zählraten deutlich steigen, was bei gleicher Messzeit zu geringeren statistischen Unsicherheiten führt. Außerdem würden sich die Messungen dann noch deutlicher von der Untergrundzählrate abheben. Wichtig ist aber dabei, dass die Zählraten nicht Fall zu groß für den Szintillationszähler werden dürfen, da die Messungen in diesem Fall unbrauchbar würden. Außerdem erhöht sich dadurch die Strahlenbelastung der Experimentatoren. Hier gilt es also genau abzuwägen und gegebenenfalls auszuprobieren, mit welchen Mengen optimale Ergebnisse erzielt werden.

Für die Messung ist es generell sinnvoll, die Untergrundstrahlung so weit wie möglich zu verringern. Hierzu sollten radioaktive Proben möglichst weit vom Versuchsaufbau entfernt werden. Alternativ kann der Versuch auch an einem Ort mit geringerer Strahlenbelastung, zum Beispiel außerhalb eines Gebäudes durchgeführt werden.

Insgesamt bot der Bleiblock hierbei aber eine gute Abschirmung. Es wäre allerdings interessant, nicht nur einmal ein Untergrundspektrum aufzunehmen, sondern mehrmals. Schließlich wurde bisher nicht berücksichtigt, dass sich die Untergrundstrahlung im Laufe der Zeit auch ändern kann. Die Veränderungen werden aber bei den vorliegenden Messreihen als sehr gering eingestuft, solange keine zusätzlichen Strahlenquellen in die Nähe des Versuchsaufbaus gestellt werden.

A Anhang

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau	2
2	Untergrundspektrum	4
3	Spektren bekannter radioaktiver Quellen ohne Untergrundstrahlung	6
4	Auftragung der Kanalnummern gegen bekannte Energien zur Kalibrierung	8
5	Spektrum der Pechblende	10
6	Messwerte vor Abzug des Untergrundspektrums	17
7	Messprotokoll Seite 1	19

Tabellenverzeichnis

1	Zuordnung bekannter Energien zu Kanalnummern zur Kalibrierung	7
2	Energien der Pechblende	11
3	Gauß-Anpassungen für die Kalibrierung	18
4	Gauß-Anpassungen für Pechblende	18

Literaturverzeichnis

- [1] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse B* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 7. Apr. 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] *Weitere Gammaskopie* (Leifi Physik, 7. Apr. 2022), <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-fortfuehrung/versuche/weitere-gammaskopie>.
- [4] *Gamma-Energien einiger bekannter Übergänge* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 6. Apr. 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/90/Versuch%2090%20Gamma-Energien.pdf>.
- [5] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Aufbau Versuch 90* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 6. Apr. 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/90/>.
- [6] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse A* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 7. Apr. 2022).
- [7] H. Wershofen U.-K. Schkade A. Heckel, *Gammaskopimetrische Bestimmung der Aktivitäten natürlicher Radionuklide* (Bundesamt für Strahlenschutz, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 8. Apr. 2022), https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Strahlenschutz/strlsch_messungen_gamma_natrad_bf.pdf.
- [8] *Zerfallsreihen* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 7. Apr. 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/90/zerfallsreihen.png>.
- [9] *Uraninite Mineral Data* (WebMineral, 8. Apr. 2022), <http://www.webmineral.com/data/Uraninite.shtml#.Y1A71MhBy3B>.

A.1 Rohdaten und daraus berechnete Größen

Messwerte vor Abzug des Untergrundspektrums

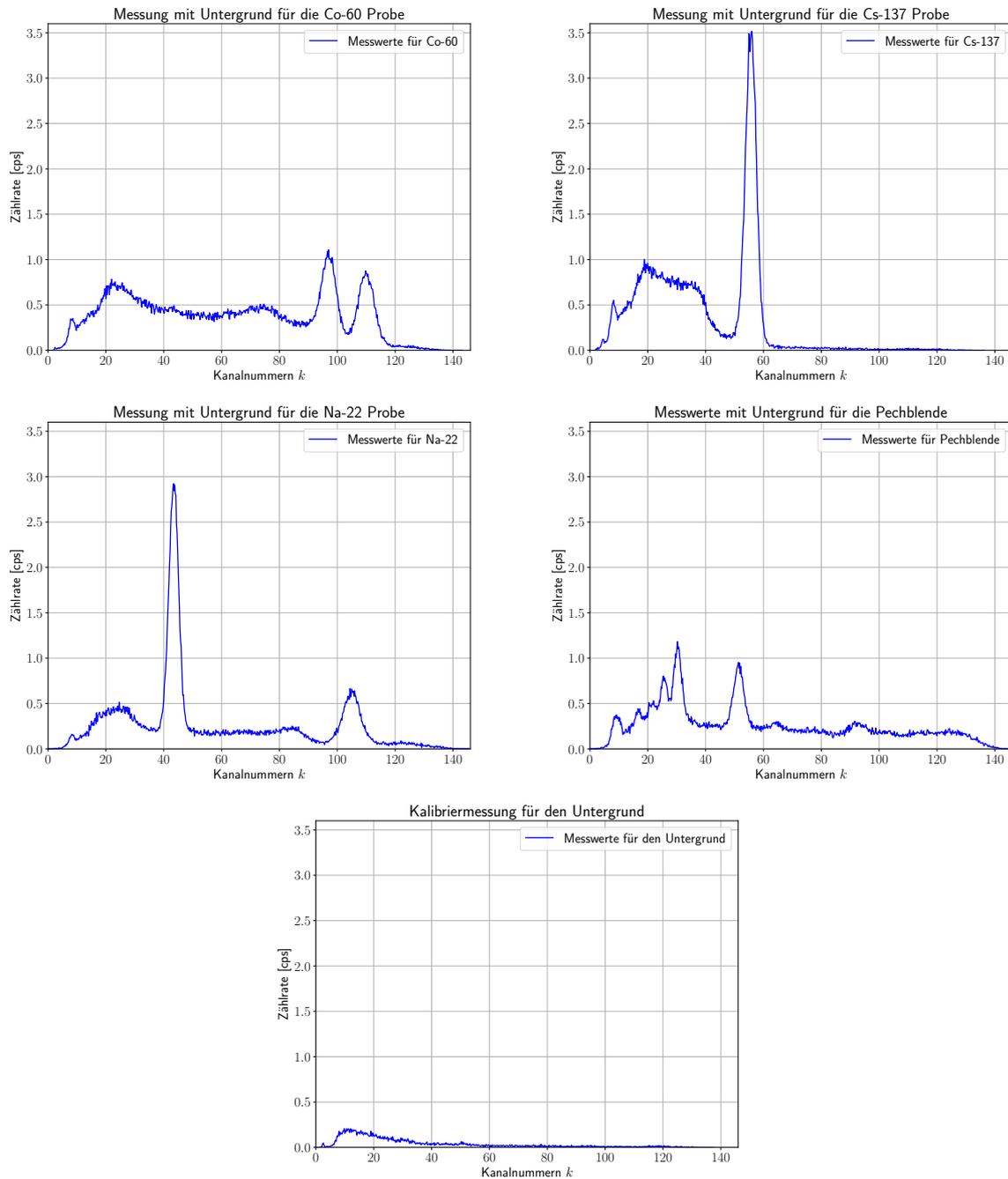


Abbildung 6: Spektren vor Abzug des Untergrundspektrums. Zunächst die drei Kalibrierungsmessungen mit ^{66}Co , ^{137}Cs und ^{22}Na , danach die Messung mit Pechblende und zuletzt die Untergrundmessung selbst, die zur Bereinigung der anderen Messreihen verwendet wurde. Alle Spektren wurden über einen Zeitraum von 10 min aufgenommen.

Gauß-Anpassungen für die Kalibrierung

Strahler	$a \pm \Delta a$ [cps]	$k_{\max} \pm \Delta k_{\max}$	$\sigma \pm \Delta \sigma$	χ^2_ν
^{60}Co	$1,000 \pm 0,016$	$96,79 \pm 0,05$	$3,14 \pm 0,05$	2,9
^{60}Co	$0,816 \pm 0,011$	$109,90 \pm 0,04$	$3,04 \pm 0,03$	1,8
^{137}Cs	$3,46 \pm 0,03$	$55,650 \pm 0,015$	$1,915 \pm 0,013$	2,2
^{22}Na	$2,81 \pm 0,03$	$43,434 \pm 0,018$	$1,839 \pm 0,017$	2,6
^{22}Na	$0,585 \pm 0,008$	$104,92 \pm 0,04$	$3,41 \pm 0,04$	1,7

Tabelle 3: Parameter-Bestwerte mit Unsicherheiten der Gauß-Anpassungen der für die Kalibrierung verwendeten, bekannten Strahler. Die Anpassungen wurden nach Gleichung (6) und nach Abzug des Untergrundspektrums mit Hilfe von gewichteter, numerischer χ^2 -Minimierung durchgeführt. Ebenfalls aufgelistet sind die reduzierten χ^2 -Werte der Anpassungen an die Messwerte. Da $\chi^2_\nu > 1$ in allen Fällen gilt, ist auf Abweichungen der Anpassungen von den Messwerten zu schließen. Diese sind auf das Rauschen, also die häufigen Schwankungen der Werte innerhalb der Messreihe zurückzuführen. Die Anpassungen sind zusammen mit den gemessenen Verläufen in [Abbildung 3](#) dargestellt. Sind mehrere Peaks in einem Diagramm, ist die Reihenfolge immer von kleinen zu großen Kanalnummern.

Gauß-Anpassungen für Pechblende

Peak	$a \pm \Delta a$ [cps]	$k_{\max} \pm \Delta k_{\max}$	$\sigma \pm \Delta \sigma$	χ^2_ν
1	$0,200 \pm 0,013$	$9,08 \pm 0,08$	$1,16 \pm 0,09$	1,5
2	$0,255 \pm 0,011$	$17,22 \pm 0,14$	$1,87 \pm 0,15$	1,5
3	$0,385 \pm 0,012$	$22,24 \pm 0,18$	$2,8 \pm 0,4$	1,2
4	$0,661 \pm 0,018$	$25,82 \pm 0,07$	$1,99 \pm 0,13$	1,8
5	$0,98 \pm 0,02$	$30,37 \pm 0,05$	$1,95 \pm 0,06$	3,0
6	$0,810 \pm 0,016$	$51,49 \pm 0,05$	$2,57 \pm 0,05$	2,8
7	$0,262 \pm 0,006$	$92,60 \pm 0,13$	$4,85 \pm 0,25$	1,3

Tabelle 4: Parameter-Bestwerte mit Unsicherheiten der Gauß-Anpassungen für Pechblende. Die Anpassungen wurden nach Gleichung (6) und nach Abzug des Untergrundspektrums mit Hilfe von gewichteter, numerischer χ^2 -Minimierung durchgeführt. Ebenfalls aufgelistet sind die reduzierten χ^2 -Werte der Anpassungen an die Messwerte. Da $\chi^2_\nu > 1$ in allen Fällen gilt, ist auf Abweichungen der Anpassungen von den Messwerten zu schließen. Diese sind auf das Rauschen, also die häufigen Schwankungen der Werte innerhalb der Messreihe zurückzuführen. Die Anpassungen sind zusammen mit dem gemessenen Verlauf in [Abbildung 5](#) dargestellt. Die Benennung der Peaks verläuft dabei von links nach rechts, also von kleinen bis hin zu großen Energien.

A.2 Messprotokoll

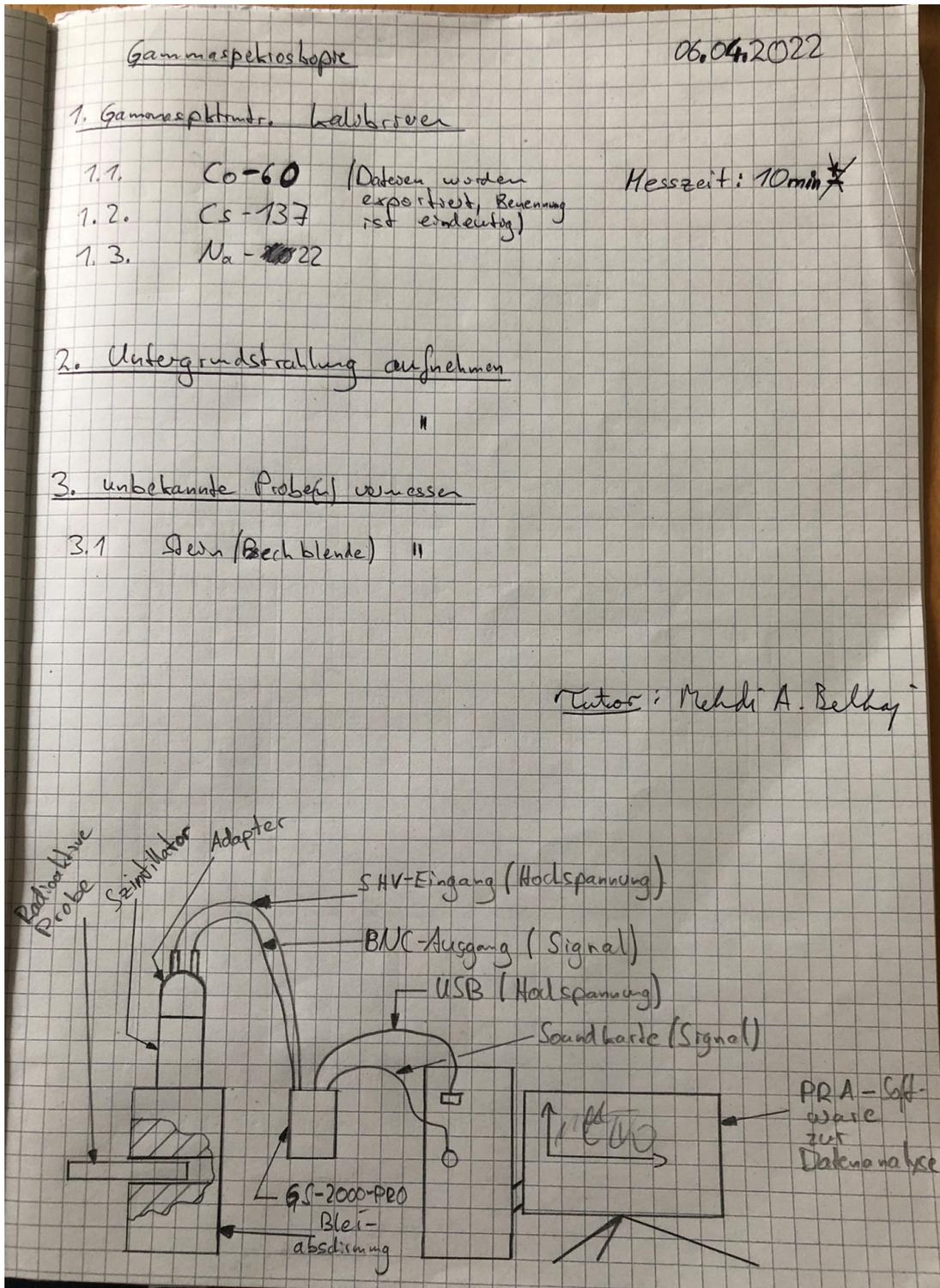


Abbildung 7: Messprotokoll Seite 1