

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Physikalische Grundlagen	3
2.0.1	Radioaktiver Zerfall	3
2.1	Verwendete Präparate	4
2.1.1	Thorium ^{228}Th	4
2.1.2	Europium ^{152}Eu	4
2.1.3	Cobalt ^{60}Co	5
2.1.4	Natrium ^{22}Na	5
2.2	Wechselwirkung von Photonen mit Materie	5
2.3	Bauteile	6
2.3.1	Szintillator	6
2.3.2	Photomultiplier	7
2.3.3	Pre-Amplifier	7
2.3.4	Main-Amplifier	7
2.3.5	Single Channel Analyser	8
2.3.6	Multichannel Analyser	8
2.3.7	Gate Generator	8
2.3.8	Timing Unit	8
2.3.9	Koinzidenz-Einheit	8
3	Aufbau	9
3.1	Thorium Spektrum	9
3.2	Koinzidenz-Messung	10
4	Durchführung	11
4.1	Thorium Spektrum	11
4.2	Koinzidenz-Messung	11
5	Auswertung	12
5.1	Energiekalibrierung	12
5.2	Spektrum von Thorium	13
5.3	Koinzidenzmessung	17
6	Zusammenfassung und Diskussion	19
7	Anhang	20
7.1	Komplette Spektren	22
7.2	Peaks der bekannten Zerfälle	23
7.3	Python Code	25

Abbildungsverzeichnis

1	Zerfallschema ^{232}Th	4
2	Vereinfachter Zerfall ^{152}Eu	5
3	Zerfallsschema ^{60}Co	5
4	Zerfallsschema ^{22}Na	5
5	Skizze: Photomultiplier	7
6	Skizze: Funktionsweise Koinzidenz-Einheit	8
7	Aufbau:Spektren Messung	9
8	Aufbau:Koinzidenz Messung	10
9	Kalibrierung des Channel-Energie-Zusammenhangs	13
10	Komplettes Thorium Spektrum	14
11	Thorium 1. Peak	14
12	Thorium 2. und 3. Peak	15
13	Thorium 4. und 5. Peak	15
14	Thorium 6. und 7. Peak	16
15	Thorium 8. und 9. Peak	16
16	Thorium 10. Peak	17
17	Ereignisverteilung bei der Koinzidenzmessung	18
18	Messaufschrieb- Seite 1	20
19	Messaufschrieb- Seite 2	21
20	Komplettes Cobalt Spektrum	22
21	Komplettes Natrium Spektrum	22
22	Komplettes Europium Spektrum	23
23	Bekannter Doppelpeak des Cobalt-Zerfalls	23
24	Erster bekannter Peak des Natrium-Zerfalls	24
25	Zweiter bekannter Peak des Natrium-Zerfalls	24
26	Bekannter Doppelpeak des Europium-Zerfalls	25

Tabellenverzeichnis

1	Dauer der Messungen	12
2	Bekannte Peaks mit zugehörigen Energien	12
3	Peaks von Thorium mit den zugehörigen Energien und vermuteten Zerfällen	17
4	Winkelmessung mit den zugehörigen Ereignissen	18

1 Einleitung

2 Physikalische Grundlagen

Die folgenden physikalischen Grundlagen beruhen auf den Ausführungen in der Anleitung zu diesem Versuch^[2] und der wissenschaftlichen Prüfungsarbeit von Tobias Kotyk^[3].

2.0.1 Radioaktiver Zerfall

Radioaktive Strahlung wird grundsätzlich in drei verschiedene Arten unterteilt. Es gibt

- α -Strahlung: Heliumkerne
- β -Strahlung: Elektron und Antineutrino bzw. Positron und Neutrino
- γ -Strahlung: Photonen

In dieser Reihenfolge hat α -Strahlung im Allgemeinen die höchste und γ -Strahlung die niedrigste Energie. Die Zerfälle können geschrieben werden als

α -Zerfall:



Der Kern spaltet also ein Heliumkern ab, welcher diskrete für das Radioisotop charakteristische Anfangsenergien besitzt.

β^- -Zerfall:



β^+ -Zerfall:



Die Energie wird auf das Elektron bzw. Positron und Neutrino aufgeteilt, sodass ein kontinuierliches Spektrum existiert.

Elektroneneinfang

Vergleichbar mit dem β^+ -Zerfall ist der Elektroneneinfang. Bei diesem Prozess gelangt ein kernnahes Elektron, meist aus der K-Schale, in den Kern und wird mit einem Proton zu einem Neutron Dies geschieht unter Emission eines Elektroneneutrinos



Auf der Schale ist folglich eine freie Stelle, welche allerdings durch ein Elektron von einer höheren Schale, durch Emission von Röntgen-Strahlung oder durch Aufnahme der freien Energie durch den Auger-Effekt(2.0.1), aufgefüllt wird. Da die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Elektronen bei schweren Atomen näher beim Kern liegt, ist bei diesen das Auftreten des Elektroneneinfangs wahrscheinlicher.

γ -Zerfall:



Beim γ - Zerfall geht der angeregte Atomkern unter Aussendung eines γ -Quants in einen energetisch günstigeren Zustand. Die Energie ist also diskret.

Innere Konversion

Bei diesem Effekt wird bei dem Übergang des Kerns in einen energetisch günstigeren Zustand kein Photon emittiert sondern die freie Energie direkt auf ein Hüllenelektron übertragen. Dieses verlässt das Atom mit der Energie

$$E_e = E_\gamma - E_B, \quad (6)$$

wobei E_γ die Energiedifferenz der Kernzustände darstellt und E_B die Bindungsenergie ist. Im Anschluss die ehemalige Schale des Elektrons nicht mehr voll besetzt. Durch das Herabfallen energetisch höher liegender Elektronen wird diese aufgefüllt. Dabei wird ein Röntgenquant emittiert oder die Energie über den Auger-Effekt (vgl. 2.0.1) an ein anderes Elektron abgegeben.

Auger-Effekt

Der Auger-Effekt beschreibt einen Prozess in der Atomhülle. Freie werdende Energie durch das Absinken eines Elektrons in eine tiefere Schale kann direkt auf ein Elektron höherer Schale übertragen werden. Dieses wird dann ebenfalls emittiert, sodass in diesem beschriebenen Zustand also zwei Fehlstellen auf verschiedenen Schalen vorliegen. Diese können wiederum durch Elektronen höherer Schalen gefüllt werden.

2.1 Verwendete Präparate

In diesem Versuch werden die Präparate ^{228}Th , ^{152}Eu , ^{22}Na und ^{60}Co verwendet. Diese sollen im Folgenden kurz betrachtet werden.

2.1.1 Thorium ^{228}Th

Thorium zerfällt zu 100% und mit einer Halbwertszeit von 698,60d über einen α -Zerfall zu ^{224}Ra . Dieser Zerfall trägt eine Energie von 5,520MeV. Thorium ist Mitglied einer Zerfallskette, welche von ^{232}Th ausgeht und dessen Endprodukt ^{208}Pb ist. Dies ist in

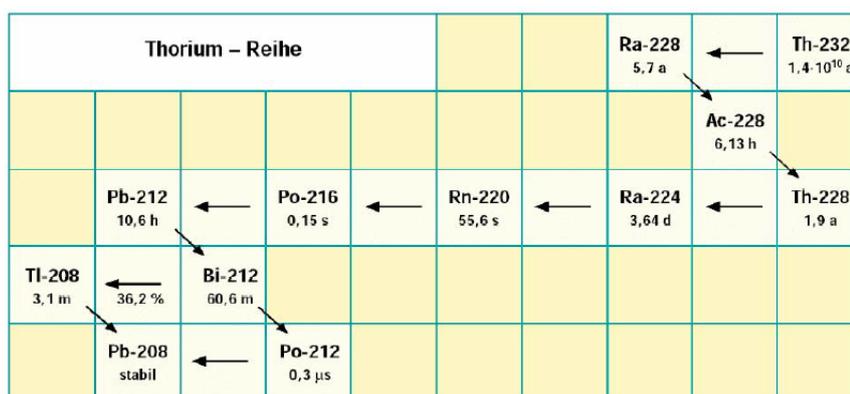


Abbildung 1: Zerfallskette von ^{232}Th welche auch das von diesem Versuch betrachtete ^{228}Th beinhaltet^[3]

2.1.2 Europium ^{152}Eu

^{152}Eu zerfällt zu 72,1% über Elektroneneinfang und zu 0,027% über das emittieren eines Positrons zu ^{152}Sm . Die Wahrscheinlichkeit über einen β^- -Zerfall zu ^{152}Gd zu zerfallen liegt bei 27,9%.

Das Schema ist sehr komplex, da in diesem Versuch nur die beiden intensivsten Peaks

für eine Energiekalibrierung benötigt werden, ist das in Abbildung 2 gezeigte Schema auf diese beiden reduziert.

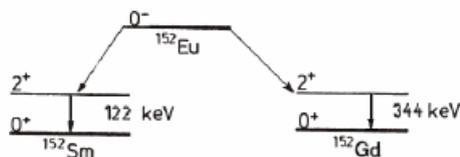


Abbildung 2: Stark vereinfachtes Zerfallsschema von ^{152}Eu . Nur die für den Versuch benötigten Übergänge sind dargestellt (Energien in MeV).^[3]

2.1.3 Cobalt ^{60}Co

^{60}Co zerfällt über einen β^- -Zerfall mit einer Halbwertszeit von 5,2714a zu ^{60}Ni . Der Kern befindet sich zu 99,2% im 4^+ -Zustand. Von dem 4^+ -Zustand geht dieser mit der größten Wahrscheinlichkeit in den 2^+ -Zustand über. Die Energiedifferenz der beiden Zustände beträgt 1173,2keV. Von diesem Kernzustand des ^{60}Ni aus zerfällt es zu dem Kerngrundzustand. Die Energie des 2^+ -Zustands beträgt 1332,5keV. Betrachtet werden im Versuch die letzten beiden genannten Übergänge. Diese sind ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt.

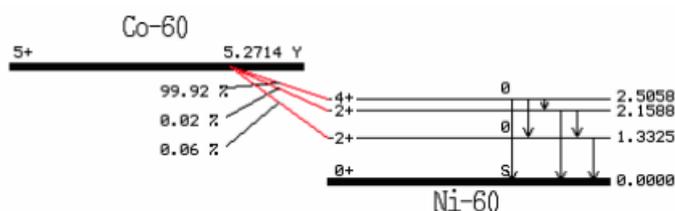


Abbildung 3: Zerfallsschema von ^{60}Co (Energien in MeV).^[3]

2.1.4 Natrium ^{22}Na

^{22}Na zerfällt mit nahezu 100% über einen β -Zerfall in den 2^+ -Zustand von ^{22}Ne . Die Halbwertszeit des ^{22}Na beträgt dabei 2,6088a. Es handelt sich zu 89,9% um einen β^+ -Zerfall und zu 10,1% um Elektroneneinfang. Die im Versuch beobachteten Peaks sind zum einen der Vernichtungspeak bei 511keV und der 1274,6keV-Peak. Diese Energie entspricht der des Photons, welches emittiert, wenn der 2^+ -Zustand des Kerns in den Grundzustand übergeht. Die verschiedenen Zerfälle können anhand von Abbildung 4 nachvollzogen werden.

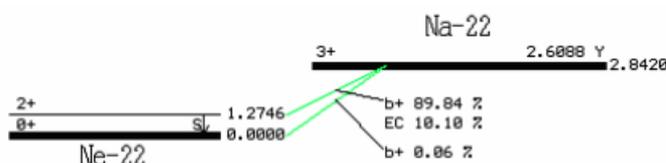


Abbildung 4: Zerfallsschema von ^{22}Na (Energien in MeV)^[3]

2.2 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

In diesem Versuch sollen Elektromagnetische Strahlung kann über Wechselwirkung mit Materie detektiert werden. Ein Photonenstrahl wird bei dem Durchdringen von Materie

durch diese Wechselwirkung abgeschwächt. Dies geschieht nach dem Abschwächungsgesetz

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x), \quad (7)$$

wobei I_0 : Anfangsintensität

μ : Absorptionskoeffizient

x : Eindringtiefe

Grund für die Abschwächung sind im wesentlichen die drei Phänomene des Photoeffekts, der Compton-Streuung und der Paarbildung. Diese seien im Folgenden kurz erläutert.

- **Photoeffekt**

Wenn ein γ -Quant auf ein Atom trifft, so kann es mittels seiner Energie $E_\gamma = h \cdot \mu$ ein Schalelektron lösen, insofern die Energie größer als die Bindungsenergie ist. Die restliche Energie $E_e = h \cdot \mu - E_B$ ist die kinetische des Elektrons. Aufgrund der Impulserhaltung kann das Elektron nicht die gesamte Energie aufnehmen und einige eV werden von dem gesamten Atom als Rückstoß aufgenommen. Häufiges Vorkommen hat der Photoeffekt bei schweren Elementen und für γ -Quanten mit einer Energie bis 100keV.

- **Comptoneffekt**

Wird nicht die gesamte Energie eines Photons von einem Elektron aufgenommen, so kann es zu einer Streuung der Photonen an diesem kommen. Das bedeutet, dass nur ein Teil der Photonenenergie $E = h\nu_0$ an das Elektron abgegeben wird. Für die Restenergie gilt der Zusammenhang

$$h \cdot \nu_c = \frac{m_0 c^2}{1 - \cos \theta + \frac{m_0 c^2}{h\nu_0}} \quad (8)$$

mit c als Lichtgeschwindigkeit und m_0 als Ruhemasse des Elektrons.

Dieser Effekt überwiegt in einem Energiebereich von einigen 100keV bis zu einigen MeV.

- **Paarbildung**

Paarbildung kann vorkommen, wenn ein γ -Quant mit einer Mindestenergie von 1,022MeV in die Nähe des Kernfeldes eines Atoms kommt. Hierbei entsteht ein Elektron und ein Positron. Im Vakuum ist dies nicht möglich, da aufgrund der Energie und Impulserhaltung ein Rückstoßpartner vorhanden sein muss. Das Positron hat eine geringe Lebensdauer und zerfällt mit einem Elektron zu zwei oder drei γ -Quanten. Die sehr viel wahrscheinlichere Art ist der Zerfall in zwei γ -Quanten mit jeweils 511keV, welche sich in einem Winkel von 180° voneinander wegbewegen.

Diese Art der Wechselwirkung ist für Energien ab einigen MeV vorherrschend.

2.3 Bauteile

An dieser Stelle sollen die verwendeten Bauteile kurz vorgestellt werden. Angegeben ist nur die Funktion, nicht die explizite Bedeutung in diesem Versuch. Diese ist teils in der Durchführung(4) erwähnt.

2.3.1 Szintillator

Ein Szintillator ist ein Material, welches durch elektromagnetische Strahlung oder geladenen Teilchen angeregt werden kann und die so aufgenommene Energie in Form von Photonen wieder abgibt. Wenn im Folgendem von einem Szintillator die Rede ist, dann ist

der Szintillationszähler gemeint. Dieser macht sich die oben genannte Eigenschaft zu nutze um die einfallende Strahlung oder Teilchen zu detektieren. Hierzu werden die entstehenden Photonen zu einem Photomultiplier(2.3.2) geleitet und von dort aus weiterverarbeitet. Man unterscheidet zwischen organischen und anorganischen Szintillatoren.

- **Organische Szintillatoren**

Szintillatoren dieser Kategorie beinhalten Kohlenstoffverbindungen. Sie sind charakterisiert durch eine kurze Abklingzeit und eignen sich dadurch sehr gut für Zeitmessungen.

- **Anorganische Szintillatoren**

Anorganische Szintillatoren hingegen haben eine längere Abklingzeit aber eine höhere Lichtausbeute. Dies ist einhergehend mit einer besseren Energieauflösung.

2.3.2 Photomultiplier

Ein Photomultiplier dient der Detektion von einzelnen wenigen Photonen. Daher ist er einem Szintillator nachgeschaltet. Die im Szintillator entstehenden Photonen lösen im Photomultiplier durch den photoelektrischen Effekt Elektronen aus einer Photokathode heraus. Hinter dieser befindet sich eine Anordnung von Dynoden (vgl. Abbildung 5). Aufgrund eines Spannungsgefälles von Dynode zu Dynode beschleunigt das Elektron nacheinander auf die einzelnen Dynoden zu und erzeugt aufgrund von Stößen weitere freie, sogenannte Sekundärelektronen. Diese Sekundärelektronen lösen dann an der folgenden Dynode wiederum weitere Elektronen aus. Ein typischer Photomultiplier mit 10 Dynoden vergrößert die Anzahl der Elektronen ungefähr um einen Faktor 10^6 .

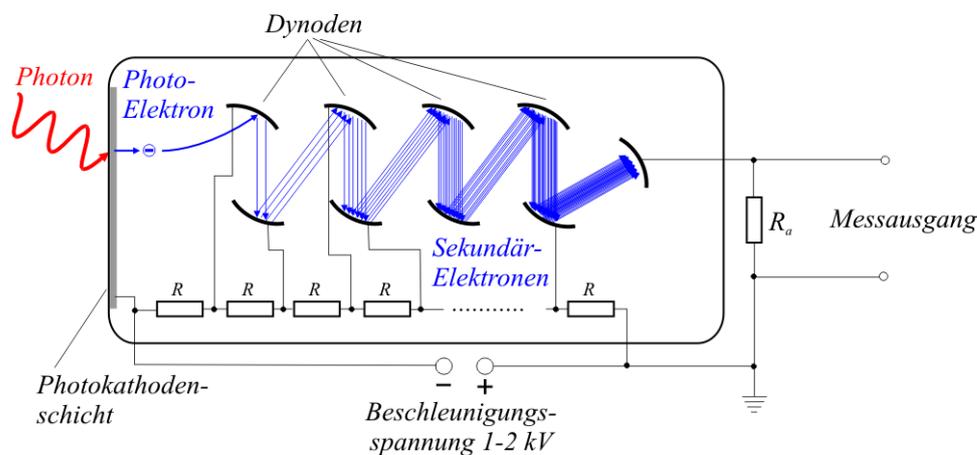


Abbildung 5: Skizze eines Photomultipliers^[1]

2.3.3 Pre-Amplifier

Ein Pre-Amplifier verstärkt ein meist sehr schwaches einkommendes Signal. Das Ausgangssignal ist näherungsweise ein exponentieller Anstieg mit flacher abfallendem Ende, welches zur weiteren Signalverarbeitung nochmals von einem Main-Amplifier verstärkt wird.

2.3.4 Main-Amplifier

Der Hauptverstärker verstärkt ein Signal vom Pre-Amplifier erneut und hat zwei verschiedene Outputs. Einen unipolaren, welcher sich dazu eignet die Energiemenge, die im Detektor deponiert wurde, zu verarbeiten und einen bipolaren, welcher sich dafür eignet Zeitinformationen von Zerfällen weiterzuleiten.

2.3.5 Single Channel Analyser

Der Single Channel Analyser bietet die Möglichkeit der Kontrolle, ob ein Signal in einem gewünschten Energiebereich liegt. So kann ein upper und ein lower Level eingestellt werden. Liegt ein Signal innerhalb des eingestellten Fensters, so wird über zwei Outputs ein Signal ausgegeben. Einen negativen und einen positiven. Ist das Signal nicht im gewünschten Bereich, so wird kein Signal ausgegeben.

2.3.6 Multichannel Analyser

Der Multichannel Analyser verarbeitet die Amplituden von eingehenden Signalen und ordnet sie der Höhe nach verschiedenen Channels zu. Steht diese Höhe, wie in diesem Versuch, für die Energie der detektierten Strahlung, so ist es möglich, ein Energiespektrum einer Probe zu erlangen. Die Zuordnung von Energien und Channel geschieht über eine Energieeichung durch als bekannt vorausgesetzte Proben.

2.3.7 Gate Generator

Der Gate Generator ist ein Bauteil, welches drei Anschlüsse besitzt. Ein Input für ein sogenanntes Enable-Signal und ein In- bzw. Output für ein beliebiges Signal. Dieses Signal kann das Gate unverändert passieren, falls ein Enable-Signal in diesem Zeitraum eintrifft.

2.3.8 Timing Unit

Die Timing Unit gibt bei vorhandenem Eingangssignal ein Ausgangssignal einer bestimmten, einstellbaren Dauer ab.

2.3.9 Koinzidenz-Einheit

Die Koinzidenz-Einheit überprüft Signale auf ihre Gleichzeitigkeit. Kommen zwei Signale gleichzeitig an der Einheit an, so wird ein Signal über den Output abgegeben. Dieses Schema ist in Abbildung 6 dargestellt. Für eine saubere Erkennung der Gleichzeitigkeit

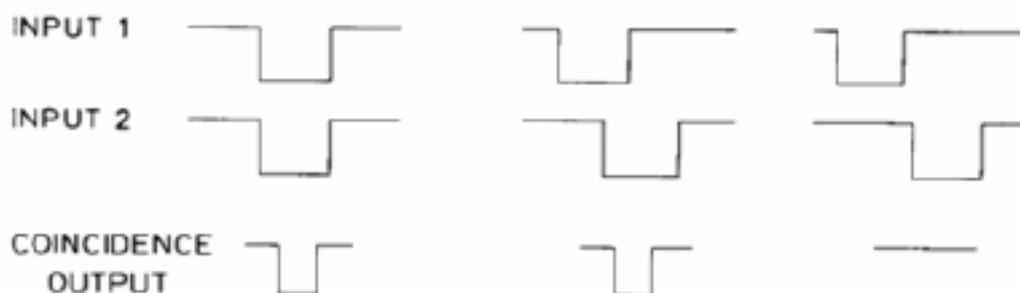


Abbildung 6: Skizzierte Funktionsweise einer Koinzidenz-Einheit ^[3]

muss gewährleistet sein, dass es zu keiner Verzögerung eines Signals durch das Durchlaufen von etwaigen Kabeln kommt.

3 Aufbau

3.1 Thorium Spektrum

Der Aufbau zur Messung des Thorium Spektrums ist in Abbildung 7 zu sehen.

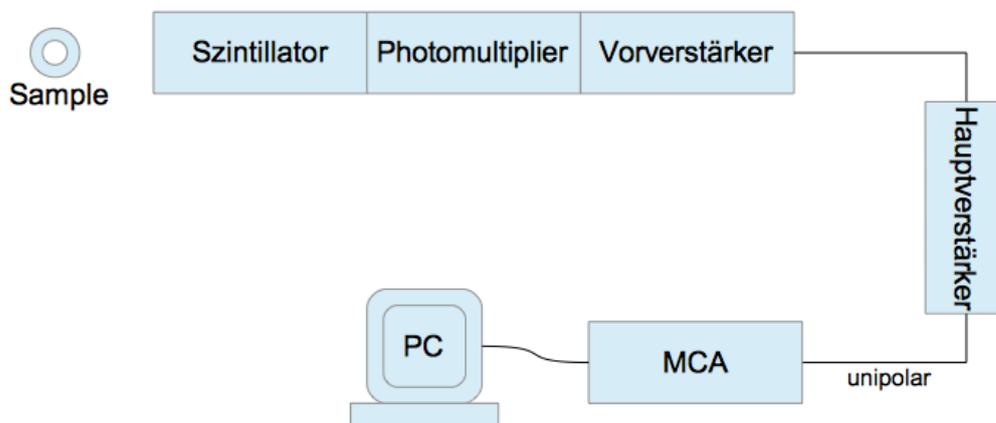


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung von Energiespektren

Die Strahlung wird von einem Szintillator detektiert. Die Photonen des Szintillators werden von einem Photomultiplier vervielfacht. Dieses Signal wird über ein Vorverstärker zu einem Hauptverstärker geleitet. An dieser Stelle wird der unipolare Ausgang gewählt, da die Information der Amplitude weitergeleitet werden soll. Der Multi Channel Analyser ordnet dieses Signal der Energie nach in verschiedene Channel ein, sodass das Energiespektrum am PC ausgelesen werden kann. Hierzu ist allerdings eine Energiekalibrierung notwendig (siehe 4.1).

3.2 Koinzidenz-Messung

Die Schaltung für die Koinzidenz-Messung ist in Abbildung 8 abgebildet.

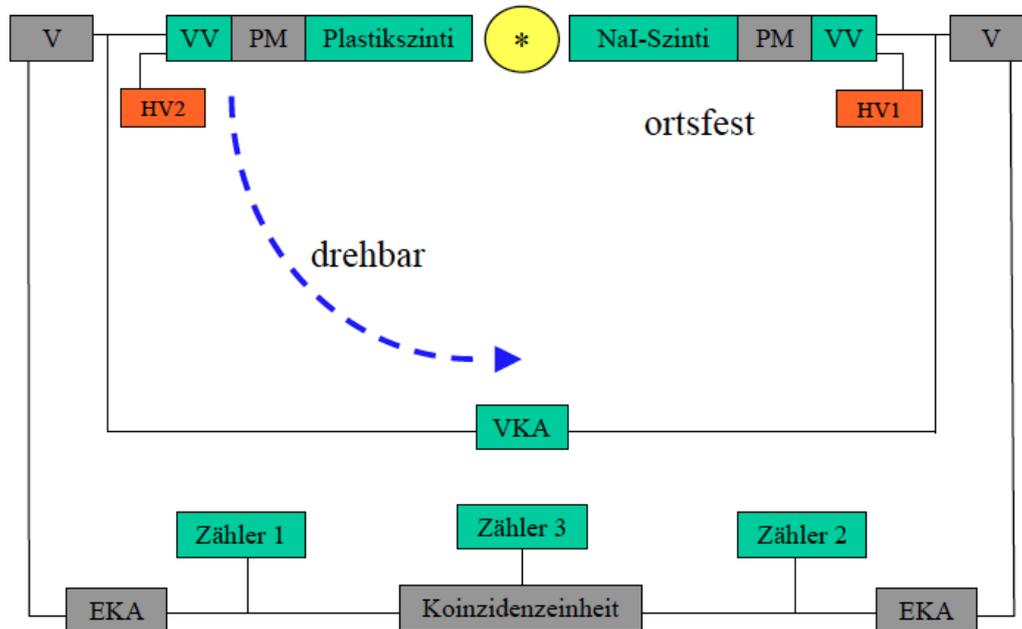


Abbildung 8: Grobe schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Koinzidenz-Messung

Für diese Messung werden zwei Szintillatoren verwendet. Hier soll nun zunächst der Zweig des NaI-Szintillators beschrieben werden.

Das Signal des des Szintillators wird an den Photomultiplier weitergeleitet. Über den Vorverstärker gelangt dieses zum Hauptverstärker. An diesem existieren nun zwei Outputs. Der unipolare Output ist mit dem linear Gate verbunden, der unipolare mit dem Single Channel Analyser. Setzt man nun den positiven Output des Single Channel Analysers als Enable-Signal des Gates ein und verbindet den Output dessen mit dem Multi Channel Analyser. Nun kann das Energiefenster des Single Channel Analysers auf eine Energie um den Bereich von 511 keV gestellt werden.

Der negative Output des Single Channel Analysers wird mit der Timing Unit verbunden. Dessen Output wird mit der Koinzidenz Einheit verbunden. Damit ist der Aufbau für die Seite des NaI-Szintillators abgeschlossen.

Der Plastikszintillator ist in Bezug auf den NaI-Szintillator drehbar gelagert, sodass Winkel von -90° bis 90° erreicht werden können. Das Signal verläuft ebenfalls über einen Photomultiplier, einen Vorverstärker und einen Hauptverstärker. Über den bipolaren Output ist dieser mit einem Single Channel Analyser verbunden, dessen Energiefenster voll geöffnet ist. Der negative Output verläuft zu der Timing Unit, die das Signal dann zu der Koinzidenz-Einheit weiterleitet. An dieser können folglich die Signale auf Gleichzeitigkeit überprüft werden. Werden zeitgleich zwei Signale an die Koinzidenz-Einheit weitergeleitet, so wird ein Signal an den HEX Counter weitergeleitet, welcher die Anzahl der Events um eins erhöht.

4 Durchführung

4.1 Thorium Spektrum

Es soll das Spektrum von Thorium ^{228}Th aufgenommen werden. Dafür ist eine Energiekalibration des Multi Channel Analysers nötig.

Die Kalibration geschieht über das Vermessen der Spektren von ^{22}Na , ^{60}Co und ^{152}Eu über jeweils 30min. Die Zerfallsenergien dieser Atome werden als bekannt vorausgesetzt. Nach der Eichung kann das Spektrum von Thorium vermessen werden. Dies geschieht über ein Zeitraum von ca. 14 Stunden. Ebenfalls wird eine Untergrundmessung über 90min durchgeführt.

4.2 Koinzidenz-Messung

Für verschiedene Winkel des Plastikszintillators bezüglich des NaI-Szintillators werden die Anzahl der Positronium-Zerfälle, dessen Photonen sich in diesem Winkel voneinander wegbewegen, gemessen. Da der interessante Peak bei einem Winkel 0° (bzw. 180° zu dem anderen Szintillationszähler) liegt, werden in diesem Bereich dichtere Messpunkte gewählt. Neben der 0° -Messung werden für die positive und negative Seite jeweils bei den Winkeln 2.5° , 5° , 10° , 20° , 30° , 60° und 90° gemessen.

Um die Signale der beiden Szintillatoren zu Vergleichen, müssen diese gleichzeitig ankommen. Dafür wird bei dem Signal des Plastikszintillators eine Verzögerung von $t = 3,7\mu\text{s}$ eingestellt. Für diese Einstellung wird ein Oszilloskop zum Signalvergleichen verwendet.

5 Auswertung

5.1 Energiekalibrierung

Um das Spektrum von Thorium zu bestimmen, werden die bekannten Spektren von Cobalt, Natrium und Europium als Kalibrierung verwendet. Zusätzlich wird noch der Untergrund gemessen, der dann auf die Messzeit der Probe t_X skaliert wird

$$\gamma = \frac{t_X}{t_{\text{Untergrund}}}.$$

Die am PC eingestellten Zeiten werden dabei als exakt angenommen. Die für die unterschiedlichen Proben gemessenen Zeiten sind in Tabelle 1 notiert.

Probe	Zeit t [s]
Natrium	1800
Cobalt	1800
Europium	1800
Thorium	51666
Untergrund	5400

Tabelle 1: Dauer der Messungen mit den verschiedene Proben

Der Fehler auf eine Ereignisanzahl N beträgt, aufgrund der Poisson-Verteilung dieser, \sqrt{N} . Für eine gemessene Anzahl an Ereignissen N_X mit Untergrund in einem Channel eines Spektrums ergibt sich mit dem Untergrund N_U

$$N_{X \text{ ohne Untergrund}} = N_{X \text{ mit Untergrund}} - N_U \cdot \gamma,$$

$$s_{N_{X \text{ ohne Untergrund}}} = \sqrt{s_{N_{X \text{ mit Untergrund}}}^2 + s_{N_U}^2 \cdot \gamma^2} = \sqrt{N_{X \text{ mit Untergrund}} + N_U \cdot \gamma^2}.$$

Die komplett aufgenommenen Spektren der Zerfälle von Natrium, Cobalt und Europium sind im Anhang 7.1 zu sehen.

Nun werden mit Python an die bekannten Peaks der drei Spektren Gauß-Funktionen der Form

$$N(x) = A \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x - Ch)^2}{\sigma^2}\right) \quad (9)$$

gefittet; dabei ist x in "Channel" angegeben und Ch die Position des Peaks. Die Grafiken dazu sind ebenfalls im Anhang 7.2 zu finden. Die Positionen der Peaks und die zugehörige Energie sind in Tabelle 2 zu sehen.

Probe	Energie [keV]	Channel
Co	1173	823 ± 18
Co	1332	931 ± 20
Na	511	368 ± 13
Na	1275	889 ± 17
Eu	122	94 ± 4
Eu	344	253 ± 10

Tabelle 2: Bekannte Peaks mit zugehörigen Energien

Die Channel der Peaks werden nun in Abbildung 9 auf die zugehörigen Energien aufgetragen. Mit einer linearen Regression kann nun allgemein ein Zusammenhang zwischen Channel und Energie hergestellt werden.

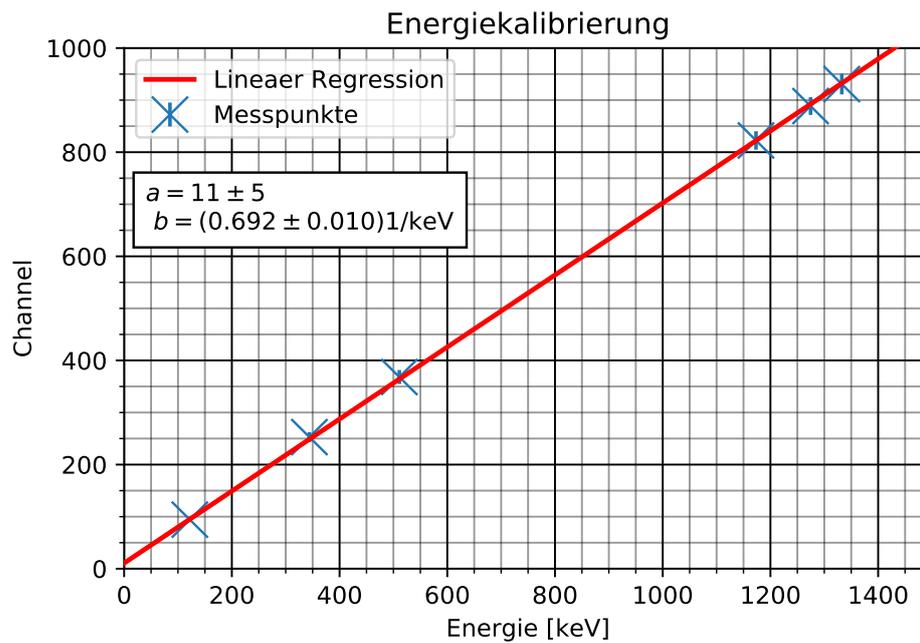


Abbildung 9: Kalibrierung des Channel-Energie-Zusammenhangs. Die lineare Regression mit Python ermöglicht eine allgemeine Umrechnungsformel.

Aus dem linearen Fit ergeben sich die Werte

$$\text{Schnittpunkt : } a = 11 \pm 5,$$

$$\text{Steigung : } b = (0,692 \pm 0,010) \frac{1}{\text{keV}}.$$

Mit der Formel

$$E = \frac{\text{Channel} - a}{b}, \quad (10)$$

$$s_E = E \cdot \sqrt{\left(\frac{s_a}{c - a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2} \quad (11)$$

kann aus einem gemessenen Channel die zugehörige Energie bestimmt werden.

5.2 Spektrum von Thorium

Das ganze aufgenommene Spektrum von Thorium ist in Abbildung 10 zu sehen. An die anderen Peaks werden, wie im vorherigen Teil 5.1, Gauss-Funktionen der Form von Gleichung 9 gefittet. Die Peaks und die zugehörigen Fits sind in den Grafiken 11, 12, 13, 14, 15 und 16 zu sehen.

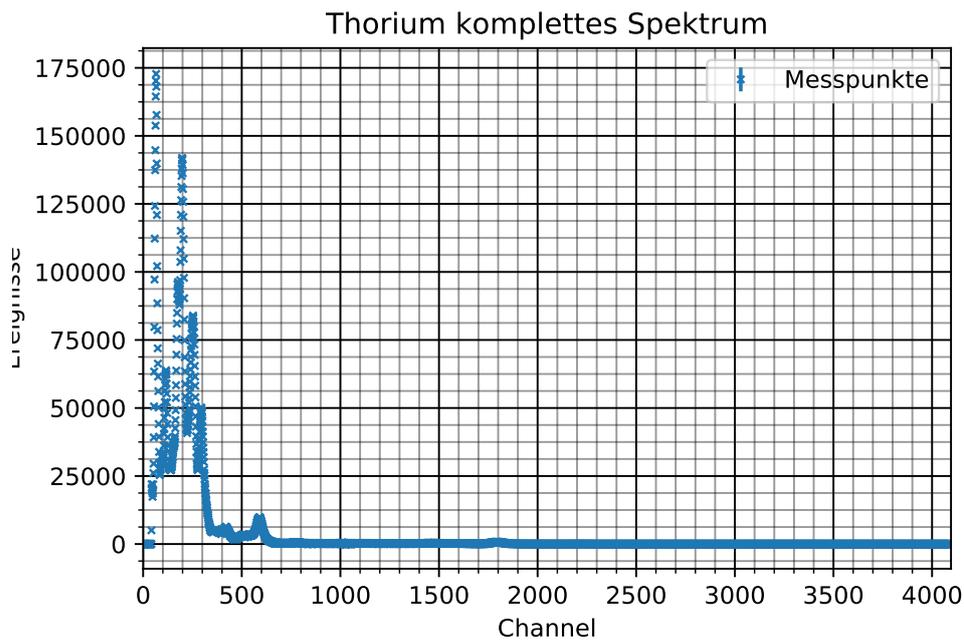


Abbildung 10: Komplettes aufgenommenes Spektrum des Zerfalls vom Thorium-228

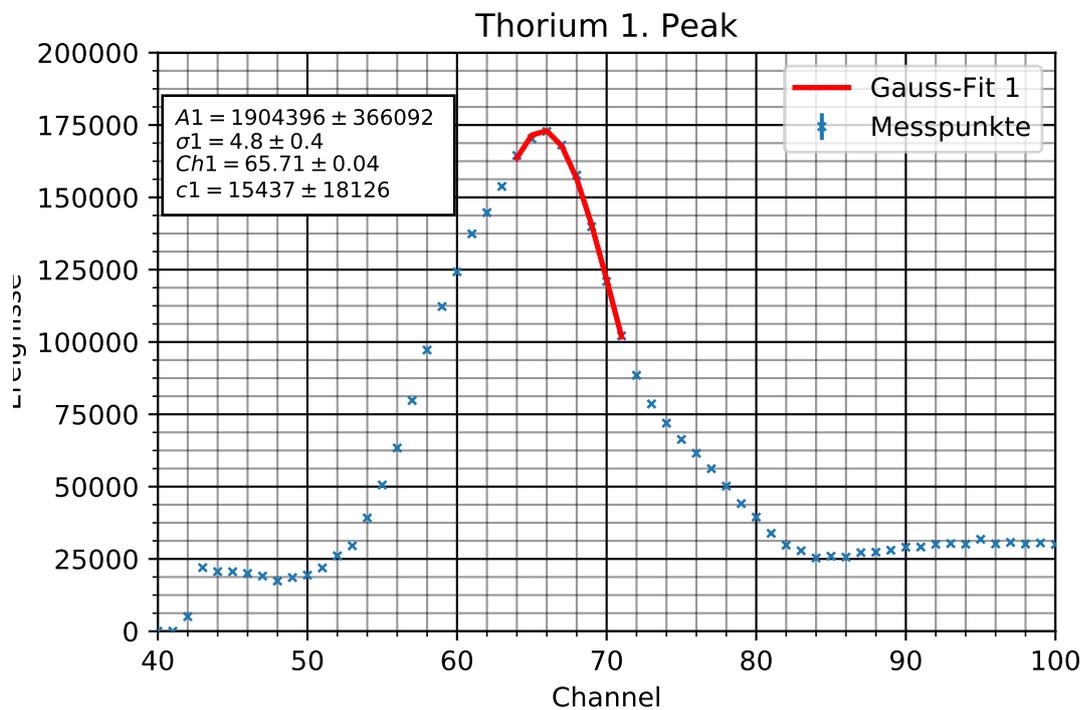


Abbildung 11: Thorium 1. Peak

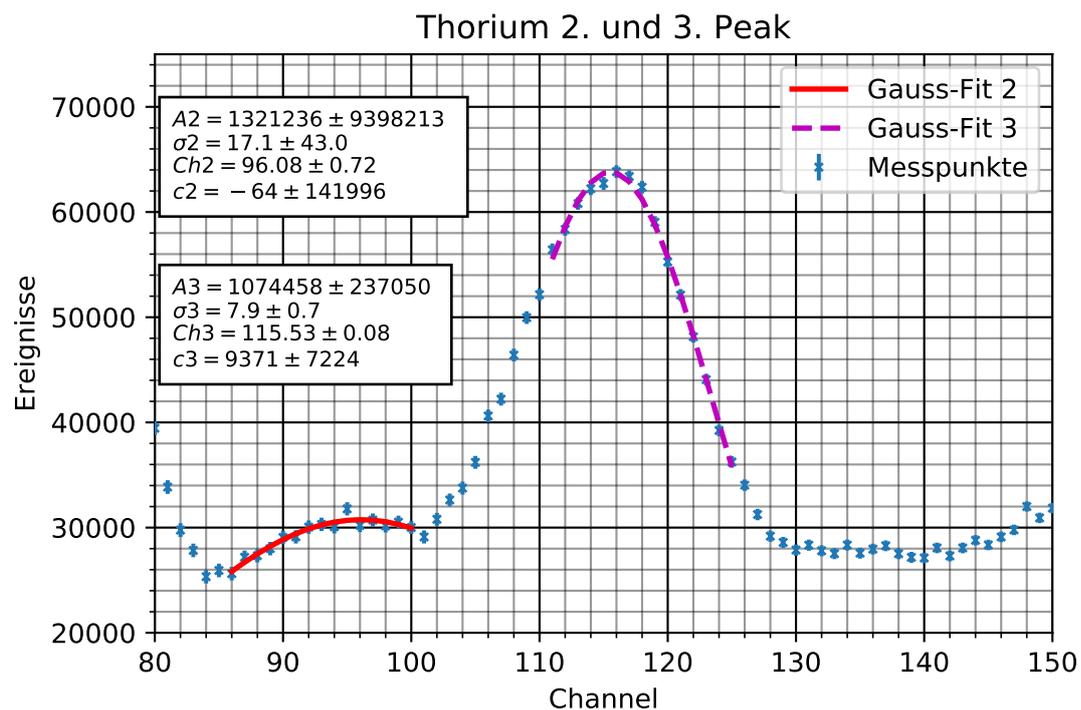


Abbildung 12: Thorium 2. und 3. Peak

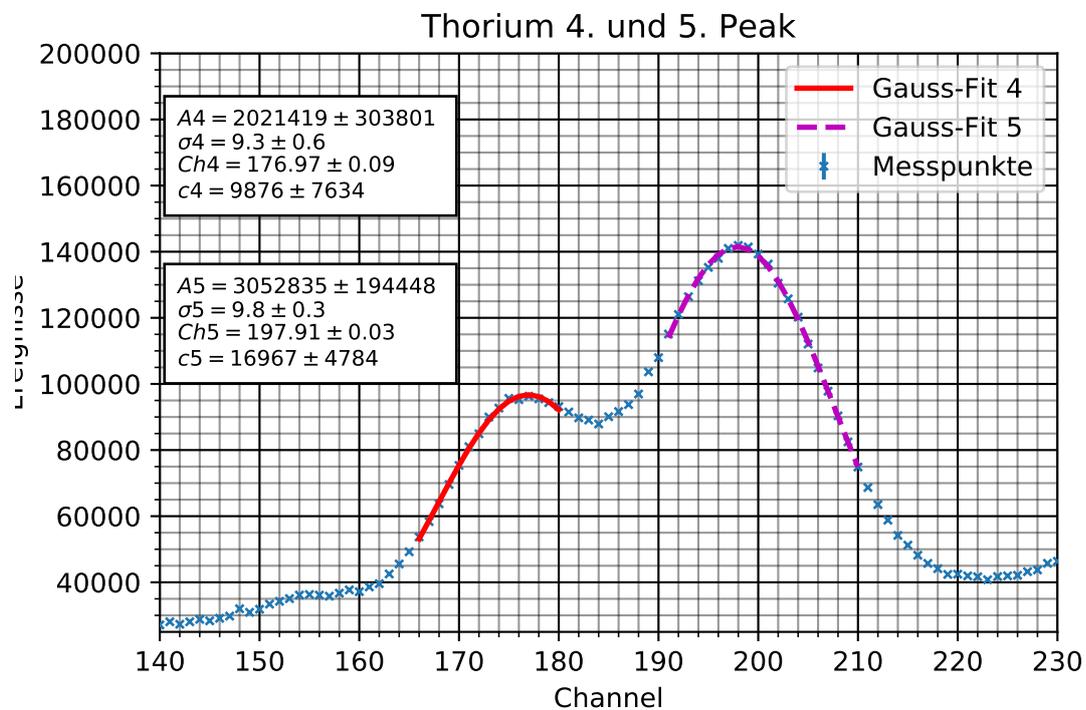


Abbildung 13: Thorium 4. und 5. Peak

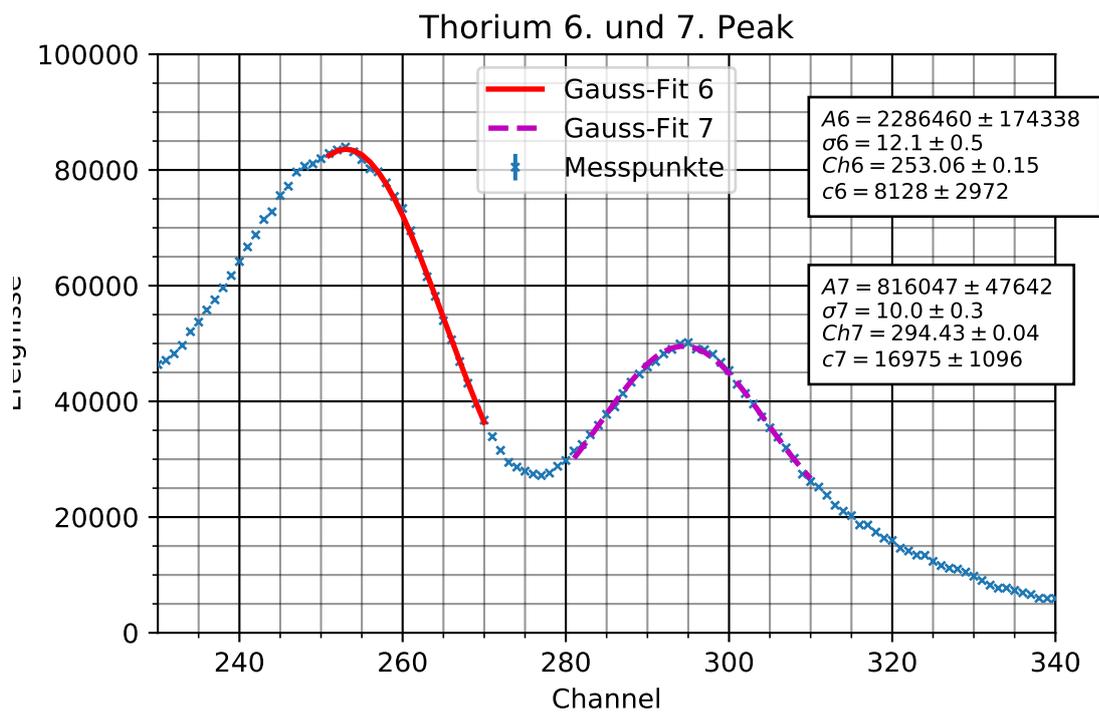


Abbildung 14: Thorium 6. und 7. Peak

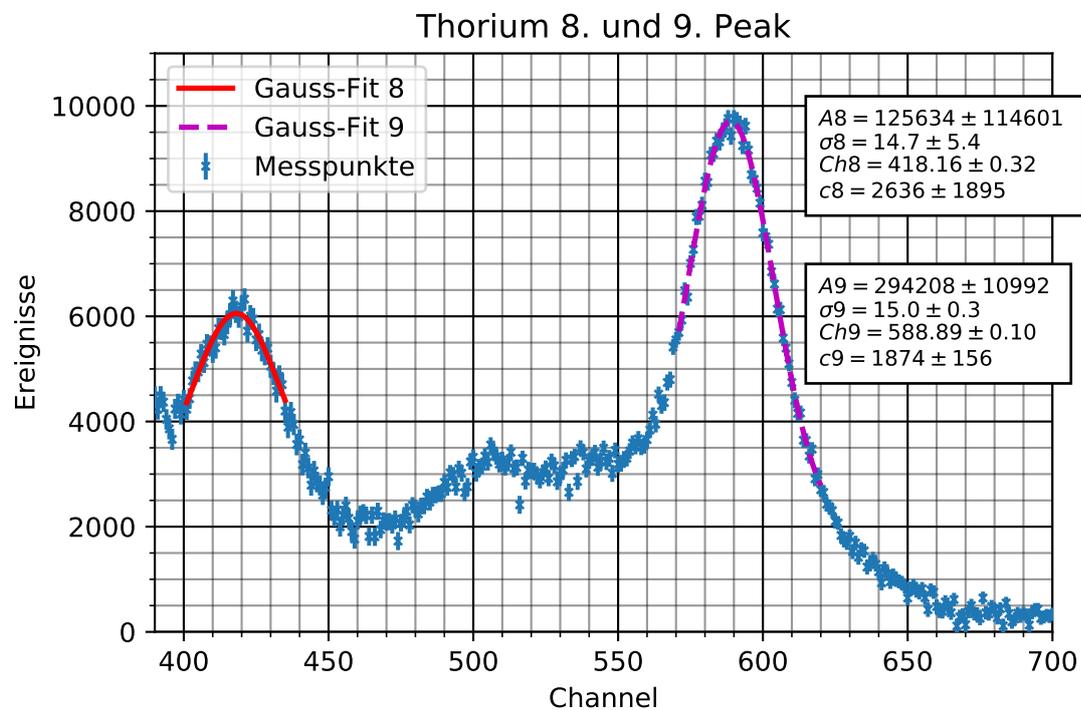


Abbildung 15: Thorium 8. und 9. Peak

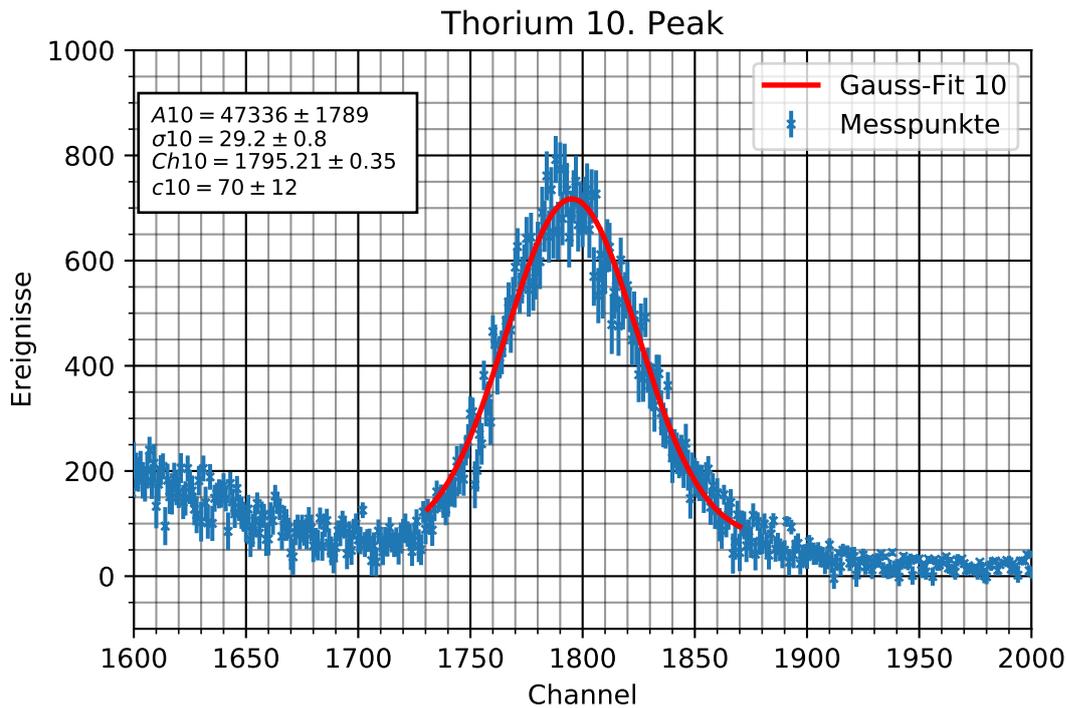


Abbildung 16: Thorium 10. Peak

Aus den Channel-Positionen der gemessenen Peaks kann nun mithilfe der Umrechnungsformel 10 die Energie bestimmt werden. Diese sind in Tabelle 3 aufgeführt. Zusätzlich sind dort auch die Zerfälle angegeben, welche diesen zugeordnet werden können. Allerdings sind nicht für alle Energien passende oder gut passende Zerfälle gefunden worden.

Peak	Channel	Energie [keV]	Zerfall 1	E_1 [keV]	Zerfall 2	E_2 [keV]
1	66 ± 5	79 ± 10	$^{228}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{224}_{88}\text{Ra}$	84,4		
2	96 ± 17	123 ± 26	$^{228}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{224}_{88}\text{Ra}$	131,6		
3	116 ± 8	151 ± 13	$^{228}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{224}_{88}\text{Ra}$	166,4		
4	177 ± 9	240 ± 15	$^{224}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{220}_{86}\text{Rn}$	241,0	$^{212}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{212}_{83}\text{Bi}$	238,6
5	198 ± 10	271 ± 16	$^{208}_{81}\text{Ti} \rightarrow ^{208}_{82}\text{Pb}$	277,4		
6	253 ± 12	350 ± 19				
7	294 ± 10	410 ± 17				
8	418 ± 15	589 ± 24	$^{208}_{81}\text{Ti} \rightarrow ^{208}_{82}\text{Pb}$	583,2	$^{212}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{212}_{84}\text{Po}$	570
9	589 ± 15	836 ± 26	$^{216}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{212}_{82}\text{Pb}$	804,9		
10	1795 ± 29	2580 ± 60	$^{212}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{212}_{84}\text{Po}$	2610	$^{208}_{81}\text{Ti} \rightarrow ^{208}_{82}\text{Pb}$	2615

Tabelle 3: Peaks von Thorium mit den zugehörigen Energien und vermuteten Zerfällen. Wenn zwei Zerfälle angegeben sind, so werden beide als mögliche Ursprünge gesehen. Die Literaturwerte wurden [3] entnommen.

5.3 Koinzidenzmessung

Für verschiedene Winkel wird die gleichzeitige Ankunft zweier 511 keV-Photonen in den beiden Szintillatoren gemessen. Der Fehler auf die Winkel wird dabei auf $s_\alpha = 0,1^\circ$ geschätzt. Der Fehler auf die detektierten Ereignisse N beträgt aufgrund einer Poisson-Verteilung $s_N = \sqrt{N}$. Die Werte sind in Tabelle 4 zu sehen. Die gemessene Anzahl an

Ereignissen wird außerdem in Abbildung 17 auf die Winkel aufgetragen.

Winkel α [°]	N
-90.00 ± 0.10	86 ± 9
-60.00 ± 0.10	85 ± 9
-30.00 ± 0.10	80 ± 9
-20.00 ± 0.10	71 ± 8
-10.00 ± 0.10	109 ± 10
-5.00 ± 0.10	644 ± 25
-2.50 ± 0.10	1058 ± 33
0.00 ± 0.10	1300 ± 40
2.50 ± 0.10	1175 ± 34
5.00 ± 0.10	995 ± 32
10.00 ± 0.10	144 ± 12
20.00 ± 0.10	92 ± 10
30.00 ± 0.10	66 ± 8
60.00 ± 0.10	72 ± 8
90.00 ± 0.10	56 ± 7

Tabelle 4: Winkelmessung mit den zugehörigen Ereignissen

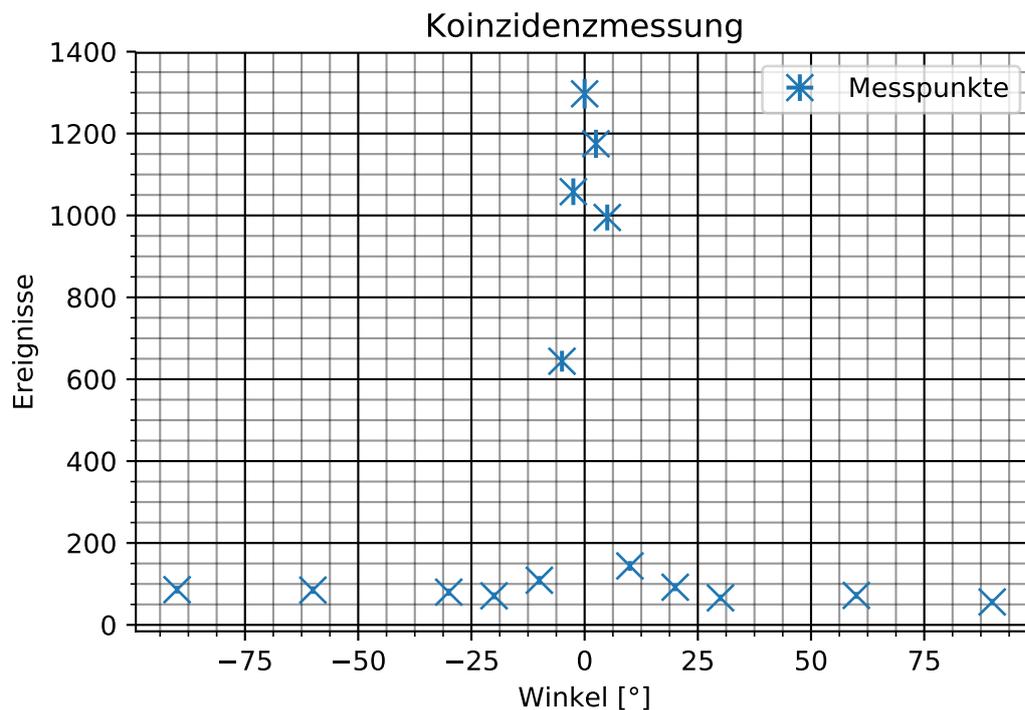


Abbildung 17: Ereignisverteilung bei der Koinzidenzmessung

Wie zu erwarten ist der Peak bei 0° . Die Ereignisse bei großen Winkeln kommen vermutlich vom Untergrund, da sie relativ gleich verteilt sind. Ebenso ist zu beobachten, dass in der Nähe von 0° bei positiven Winkel immer mehr Ereignisse registriert wurden als bei negativen Winkel. Eine Vermutung ist, dass die angegebenen Winkel nicht ganz zu dem Winkel zwischen den Szintillatoren passen. Die Breite des Peaks kommt hauptsächlich durch die Breite des Detektionswinkel der Szintillatoren zustande.

6 Zusammenfassung und Diskussion

Mithilfe bekannter Zerfälle konnten den Peaks im Zerfallsschema von Thorium-228 Energien zugewiesen werden. Allerdings stimmen diese nur teilweise mit Literaturwerten überein. Für die gefundenen Peaks bei den Energien (350 ± 19) keV und (410 ± 17) keV konnten keine Zerfälle aus der Zerfallsreihe ermittelt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, dass neben Thorium-228 ein anderes radioaktives Material in der Probe war.

Bei der Koinzidenzmessung wurde bestätigt, dass die Photonen des Positronium-Zerfalls in einem Winkel von 180° auseinander fliegen. Dieser Versuch eignet sich gut um einen solchen Winkel zu bestimmen. Für exaktere Ergebnisse wäre es nötig eine Untergrundmessung durchzuführen. Eine weitere Verbesserung wäre den Detektionswinkel der Szintillatoren zu verkleinern um den Peak weiter zu schmälern.

7 Anhang

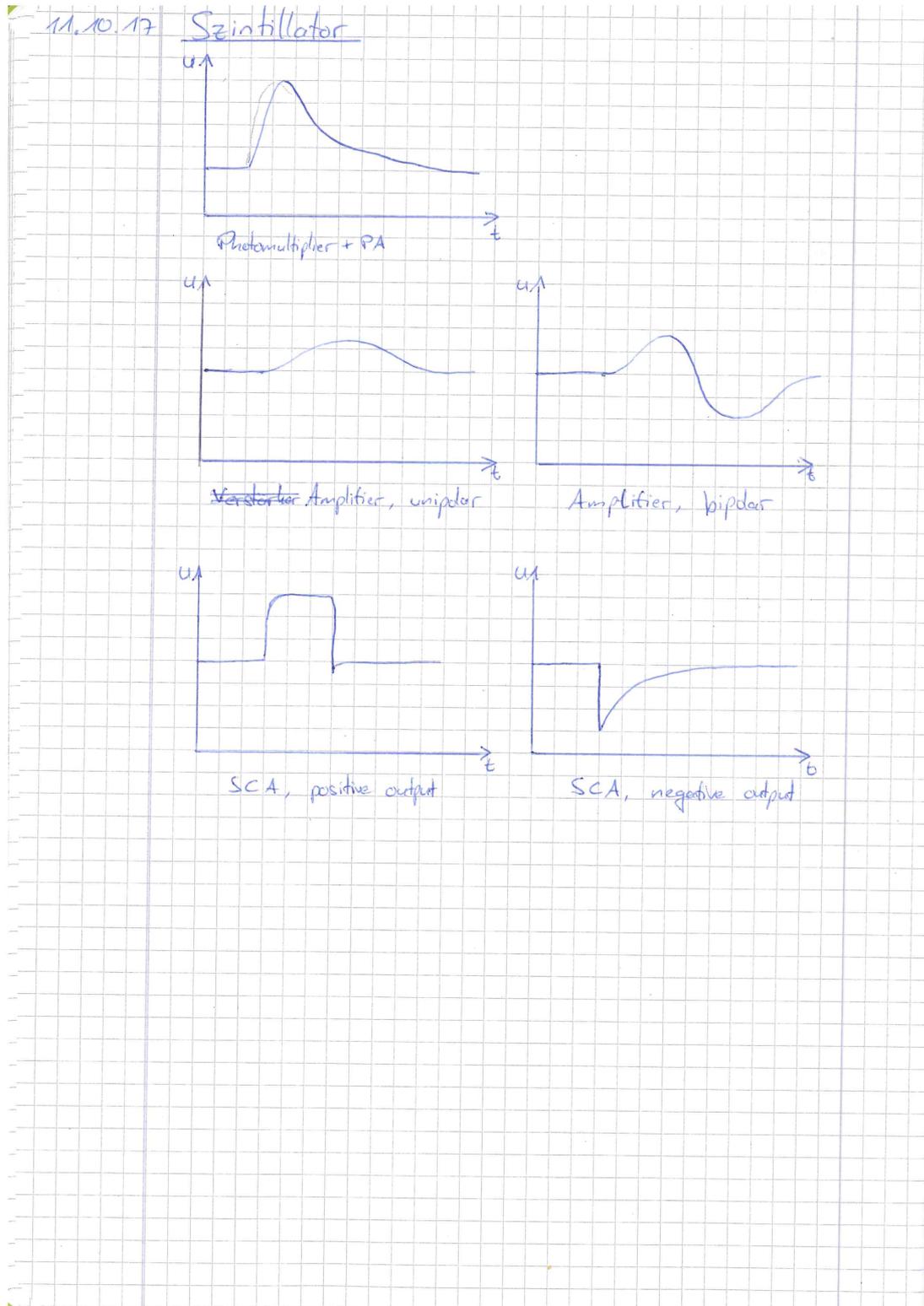


Abbildung 18: Messaufschrieb- Seite 1 (Spannungsverläufe am Oszilloskopen nach den einzelnen Bauteilen)

Winkel [°]	Counts
90	56
60	72
30	66
0	1297
-30	80
-60	85
-90	86
20	92
10	144
5	995
-5	644
-10	109
-20	71
2,5	1175
-2,5	1058

Fehler Winkel: $0,1^\circ$

Abbildung 19: Messaufschrieb- Seite 2 (Messdaten zur Koinzidenz-Messung)

7.1 Komplette Spektren

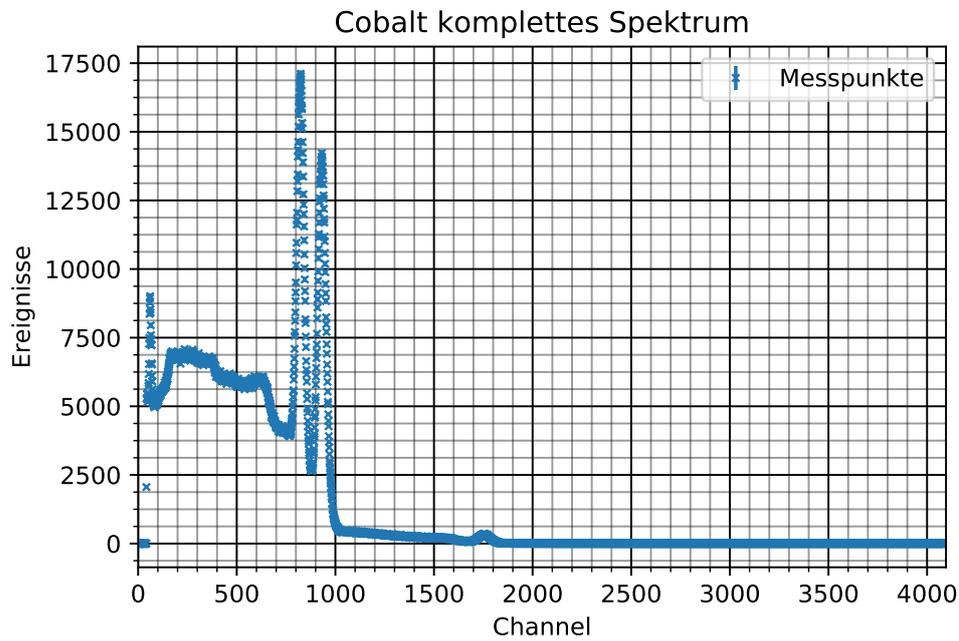


Abbildung 20: Komplettes aufgenommenes Spektrum des Zerfalls von Cobalt-60

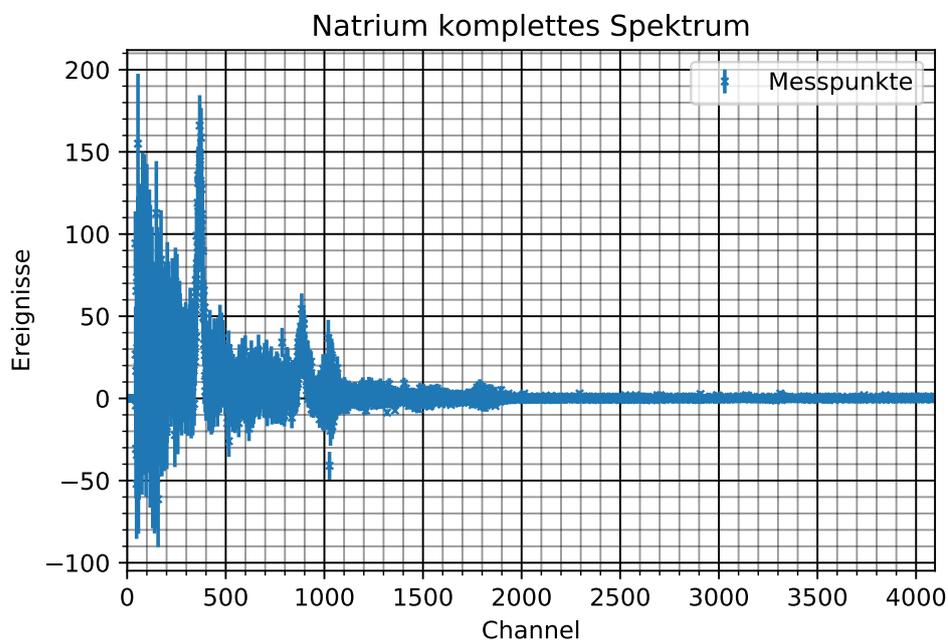


Abbildung 21: Komplettes aufgenommenes Spektrum des Zerfalls von Natrium-22

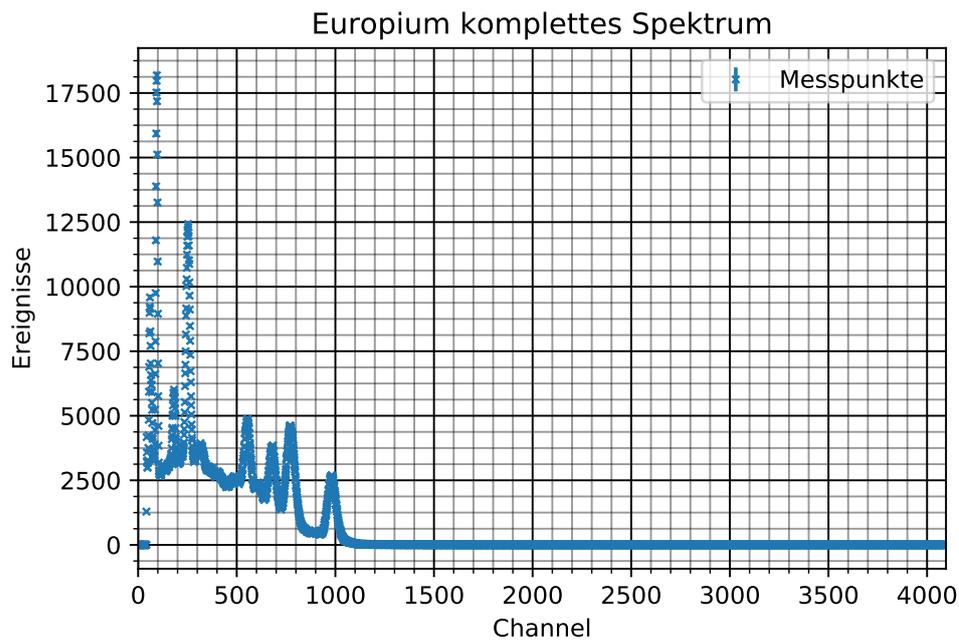


Abbildung 22: Komplettes aufgenommenes Spektrum des Zerfalls von Europium-152

7.2 Peaks der bekannten Zerfälle

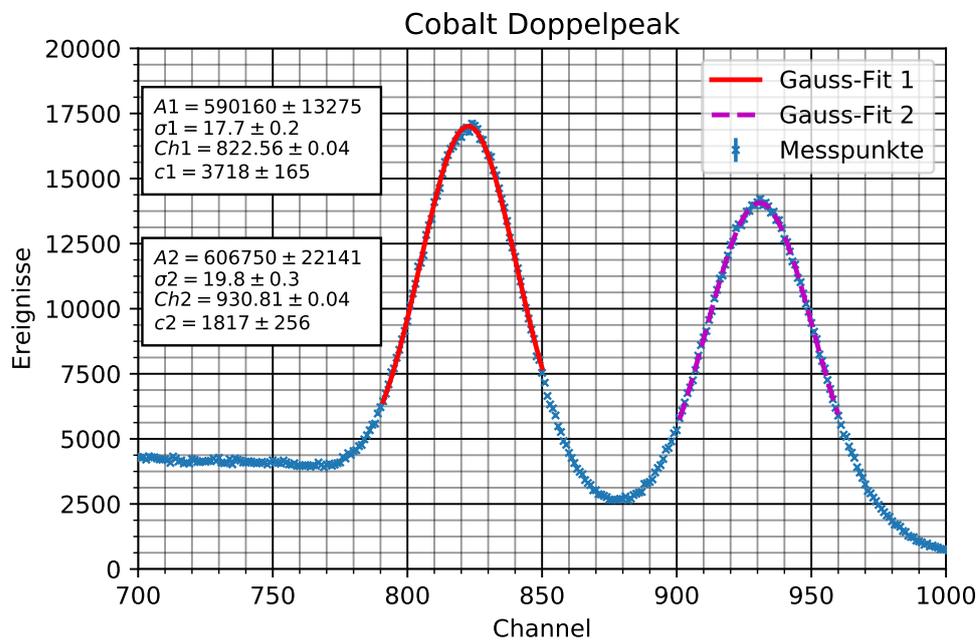


Abbildung 23: Bekannter Doppelpeak des Cobalt-Zerfalls

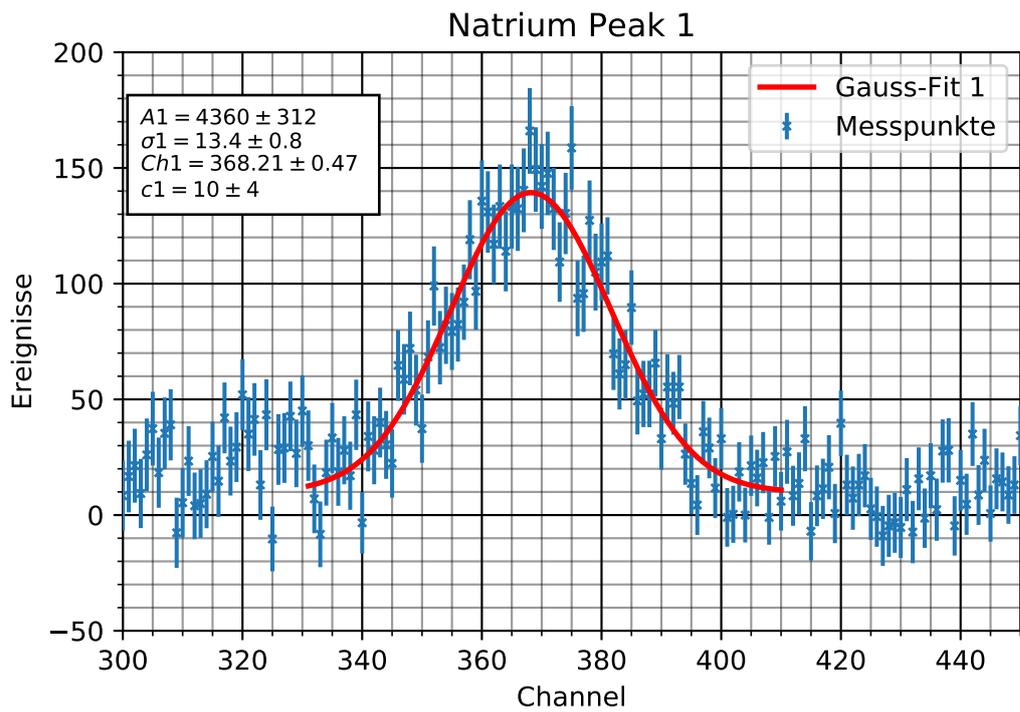


Abbildung 24: Erster bekannter Peak des Natrium-Zerfalls

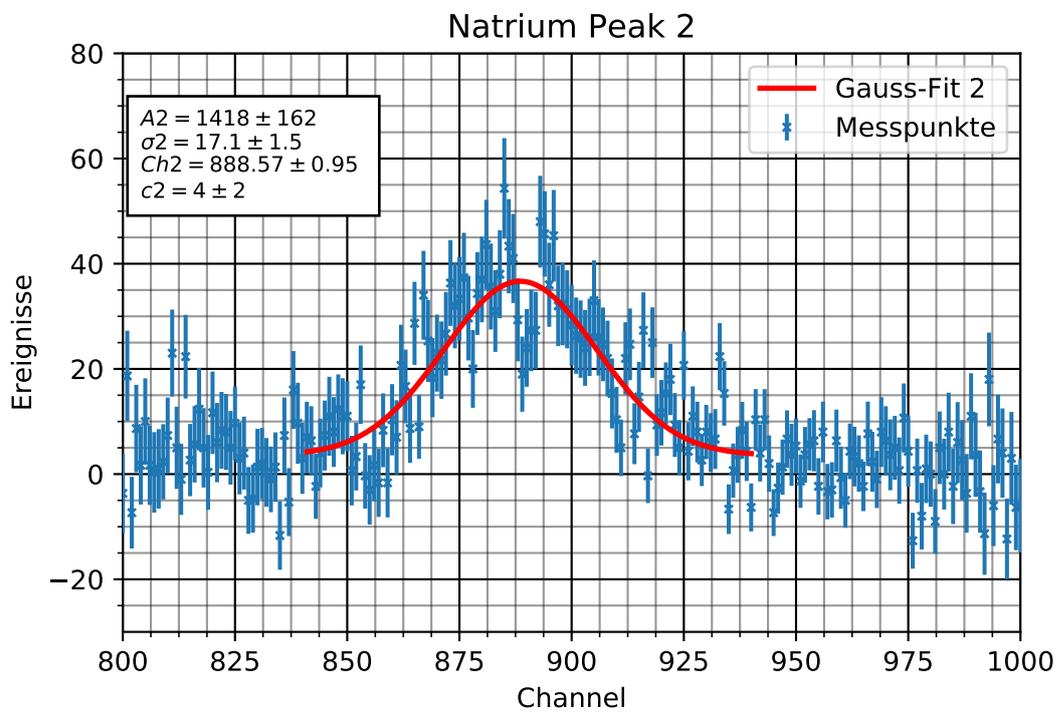


Abbildung 25: Zweiter bekannter Peak des Natrium-Zerfalls

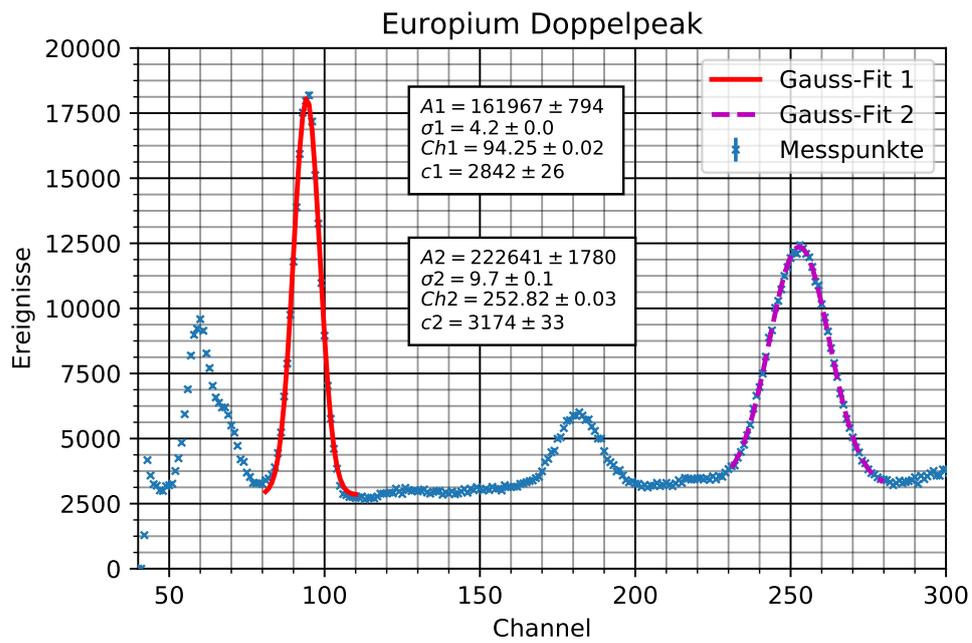


Abbildung 26: Bekannter Doppelpeak des Europium-Zerfalls

7.3 Python Code

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Thu Oct 12 14:43:07 2017

@author: Nils
"""

#%%
import numpy as np
from uncertainties import ufloat
from matplotlib import pyplot as plt
#import scipy.optimize as opt
import uncertainties.unumpy as unp

#%% Daten
w=[90,60,30,0,-30,-60,-90,20,10,5,-5,-10,-20,2.5,-2.5]
c=[56,72,66,1297,80,85,86,92,144,995,644,109,71,1175,1058]
sw=0.1

i=0
while i<14:
    if w[i]>w[i+1]:
        a=w[i]
        w[i]=w[i+1]
        w[i+1]=a
        b=c[i]
        c[i]=c[i+1]
        c[i+1]=b
        i=0
    else:
        i=i+1

for i in range(0,15):
    w[i]=ufloat(w[i],sw)
    c[i]=ufloat(c[i],np.sqrt(c[i]))

plt.errorbar(unp.nominal_values(w),unp.nominal_values(c),xerr=unp.std_devs(w),
             yerr=unp.std_devs(c),fmt='x',markersize=10,label='Messpunkte')
plt.grid(b=True,which='major',color='k',linestyle='-')
plt.grid(b=True,which='minor',color='k',linestyle='-',alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.xlabel('Winkel [°]')
plt.ylabel('Ereignisse')
#plt.xlim(xu, xo)
#plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Koinzidenzmessung')
plt.savefig('Grafik_Koinzidenz.pdf')
plt.show()

#%% Tabelle
f= open('Tabelle_Koinz.txt', 'w')
for i in range(0,len(w)):
    f.write('$')
    f.write(str(w[i]))
    f.write('$& \t $')
    f.write(str(c[i]))
    f.write('$ \\\ ' )
    f.write('\n')
f.close()

```

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Thu Oct 12 18:46:09 2017

@author: Nils
"""

import numpy as np
from uncertainties import ufloat
from matplotlib import pyplot as plt
import scipy.optimize as opt
import uncertainties.unumpy as unumpy

#%% Einlesen
E=[1173.228, 1332.492, 511, 1274.537, 122, 344]
Calib=[0,0,0,0,0,0] #Co1, Co2, Na1, Na2, Eu1, Eu2

Thor=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]

Untergrund=[]
Cobalt=[]
Natrium=[]
Europium=[]
Thorium=[]
Channel=[]
i=0

readerUntergrund = np.loadtxt('Untergrund4.txt')
for row in readerUntergrund:
    Untergrund.append(ufloat(row[0],np.sqrt(row[0])))
    i=i+1
    Channel.append(i)
readerCobalt = np.loadtxt('Cobalt4.txt')
for row in readerCobalt:
    Cobalt.append(ufloat(row[0],np.sqrt(row[0])))
readerNatrium = np.loadtxt('Natrium4.txt')
for row in readerNatrium:
    Natrium.append(ufloat(row[0],np.sqrt(row[0])))
readerEuropium = np.loadtxt('Europium4.txt')
for row in readerEuropium:
    Europium.append(ufloat(row[0],np.sqrt(row[0])))
readerThorium = np.loadtxt('Thorium4.txt')
for row in readerThorium:
    Thorium.append(ufloat(row[0],np.sqrt(row[0])))

Untergrund[0]=0
Untergrund[1]=0
Cobalt[0]=0
Cobalt[1]=0
Natrium[0]=0
Natrium[1]=0
Europium[0]=0
Europium[1]=0
Thorium[0]=0
Thorium[1]=0

Untergrund=np.asarray(Untergrund)
Cobalt=np.asarray(Cobalt)
Natrium=np.asarray(Natrium)
Europium=np.asarray(Europium)
Thorium=np.asarray(Thorium)

```

```

#% Untergrund abziehen
t=51666/(1800*3)

Cobalt=Cobalt-Untergrund/3
Natrium=Natrium-Untergrund/3
Europium=Europium-Untergrund/3
Thorium=Thorium-Untergrund*t

#% Gauss
def gauss(x,A,s,xc,c):
    return A/np.sqrt(2*np.pi*np.sqrt(s)**4)*np.exp(-(x-xc)**2/(2*np.sqrt(s)**4))+c

def lin(x,a,b):
    return a+b*x

#% Cobalt komplett
plt.errorbar(Channel,unp.nominal_values(Cobalt),yerr=unp.std_devs(Cobalt),
             fmt='x', markersize=3,label='Messpunkte')
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(0, 4096)
#plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Cobalt komplettes Spektrum')
plt.savefig('Grafik_Cobalt_komplett.pdf')
plt.show()

#% Cobalt
Co1=Cobalt[790:850]
Ch1=Channel[790:850]
popt,pcov=opt.curve_fit(gauss, Ch1, unp.nominal_values(Co1),
                       p0=[13000,20,825,3000], sigma=unp.std_devs(Co1),
                       absolute_sigma=True)

Co2=Cobalt[900:960]
Ch2=Channel[900:960]
popt2,pcov2=opt.curve_fit(gauss, Ch2, unp.nominal_values(Co2),
                          p0=[10000,20,930,2000], sigma=unp.std_devs(Co2),
                          absolute_sigma=True)

xu=700
xo=1000
yu=0
yo=20000

plt.plot(Ch1, gauss(Ch1, *popt),'r-',zorder=5, linewidth=2,label='Gauss-Fit 1')
plt.plot(Ch2,gauss(Ch2, *popt2),'m--',zorder=6,linewidth=2,label='Gauss-Fit 2')
plt.errorbar(Channel,unp.nominal_values(Cobalt),yerr=unp.std_devs(Cobalt),
             fmt='x', zorder=3, markersize=3,label='Messpunkte')
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.text(xu+(xo-xu)*0.02, yo-(yo-yu)*0.25, '$A1=%.0f \pm %.0f$ \n'
        r'$\sigma 1' '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch1=%.2f \pm %.2f$ \n'
        '$c1=%.0f \pm %.0f$'%(popt[0],np.sqrt(pcov[0,0]),popt[1],
        np.sqrt(pcov[1,1]),popt[2],np.sqrt(pcov[2,2]),
        popt[3],np.sqrt(pcov[3,3])),

```

```

        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white',
                                         'alpha':1, 'pad':5})
plt.text(xu+(xo-xu)*0.02, yo-(yo-yu)*0.54, '$A2=%.0f \pm %.0f$ \n' r'\sigma 2'
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch2=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c2=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt2[0],np.sqrt(pcov2[0,0]),popt2[1],np.sqrt(pcov2[1,1]),popt2[2],
        np.sqrt(pcov2[2,2]),popt2[3],np.sqrt(pcov2[3,3])),
        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
                                         'pad':5})

plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(xu, xo)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Cobalt Doppelpeak')
plt.savefig('Grafik_Cobalt_peak1.pdf')
plt.show()

Calib[0]=ufloat(popt[2],popt[1])
Calib[1]=ufloat(popt2[2],popt2[1])

### Natrium komplett
plt.errorbar(Channel,unp.nominal_values(Natrium),yerr=unp.std_devs(Natrium),
            fmt='x', markersize=3,label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(0, 4096)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Natrium komplettes Spektrum')
plt.savefig('Grafik_Natrium_komplett.pdf')
plt.show()

### Natrium
Na1=Natrium[330:410]
Ch1=Channel[330:410]
popt,pcov=opt.curve_fit(gauss, Ch1, unp.nominal_values(Na1),
                       p0=[130,15,370,10], sigma=unp.std_devs(Na1),
                       absolute_sigma=True)

Na2=Natrium[840:940]
Ch2=Channel[840:940]
popt2,pcov2=opt.curve_fit(gauss, Ch2, unp.nominal_values(Na2),
                          p0=[40,20,890,10], sigma=unp.std_devs(Na2),
                          absolute_sigma=True)

xu=300
xo=450
yu=-50
yo=200
plt.plot(Ch1, gauss(Ch1, *popt),'r-',zorder=5, linewidth=2,label='Gauss-Fit 1')
plt.errorbar(Channel,unp.nominal_values(Natrium),yerr=unp.std_devs(Natrium),
            fmt='x', zorder=3, markersize=3,label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.text(xu+(xo-xu)*0.02, yo-(yo-yu)*0.25, '$A1=%.0f \pm %.0f$ \n' r'\sigma 1'
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch1=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c1=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt[0],np.sqrt(pcov[0,0]),popt[1],np.sqrt(pcov[1,1]),popt[2],
        np.sqrt(pcov[2,2]),popt[3],np.sqrt(pcov[3,3])),

```

```

        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
                                         'pad':5})

plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(xu, xo)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Natrium Peak 1')
plt.savefig('Grafik_Natrium_peak1.pdf')
plt.show()

xu=800
xo=1000
yu=-30
yo=80
plt.plot(Ch2, gauss(Ch2, *popt2), 'r-', zorder=6, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 2')
plt.errorbar(Channel,unp.nominal_values(Natrium),yerr=unp.std_devs(Natrium),
             fmt='x', zorder=3, markersize=3,label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.text(xu+(xo-xu)*0.02, yo-(yo-yu)*0.25, '$A2=%.0f \pm %.0f$ \n' r'$\sigma 2'$
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch2=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c2=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt2[0],np.sqrt(pcov2[0,0]),popt2[1],np.sqrt(pcov2[1,1]),popt2[2],
          np.sqrt(pcov2[2,2]),popt2[3],np.sqrt(pcov2[3,3])),
        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
                                         'pad':5})

plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(xu, xo)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Natrium Peak 2')
plt.savefig('Grafik_Natrium_peak2.pdf')
plt.show()

Calib[2]=ufloat(popt[2],popt[1])
Calib[3]=ufloat(popt2[2],popt2[1])

### Europium komplett
plt.errorbar(Channel,unp.nominal_values(Europium),yerr=unp.std_devs(Europium),
             fmt='x', markersize=3,label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(0, 4096)
#plt.ylim(0, 20)
plt.title('Europium komplettes Spektrum')
plt.savefig('Grafik_Europium_komplett.pdf')
plt.show()

### Europium 1
Eu1=Europium[80:110]
Ch1=Channel[80:110]
popt,pcov=opt.curve_fit(gauss, Ch1, unp.nominal_values(Eu1),
                       p0=[15000,6,95,4000], sigma=unp.std_devs(Eu1),
                       absolute_sigma=True)

```

```

Eu2=Europium[230:280]
Ch2=Channel[230:280]
popt2,pcov2=opt.curve_fit(gauss, Ch2, unp.nominal_values(Eu2),
                           p0=[9000,10,255,4000], sigma=unp.std_devs(Eu2),
                           absolute_sigma=True)

xu=40
xo=300
yu=0
yo=20000

plt.plot(Ch1, gauss(Ch1, *popt), 'r-', zorder=5, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 1')
plt.plot(Ch2, gauss(Ch2, *popt2), 'm--', zorder=6, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 2')
plt.errorbar(Channel, unp.nominal_values(Europium), yerr=unp.std_devs(Europium),
             fmt='x', zorder=3, markersize=3, label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.text(xo-(xo-xu)*0.65, yo-(yo-yu)*0.25, '$A1=%.0f \pm %.0f$ \n' r'$\sigma 1$'
         '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch1=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c1=%.0f \pm %.0f$'
         %(popt[0], np.sqrt(pcov[0,0]), popt[1], np.sqrt(pcov[1,1]), popt[2],
           np.sqrt(pcov[2,2]), popt[3], np.sqrt(pcov[3,3])),
         style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
           'pad':5})
plt.text(xo-(xo-xu)*0.65, yo-(yo-yu)*0.54, '$A2=%.0f \pm %.0f$ \n' r'$\sigma 2$'
         '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch2=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c2=%.0f \pm %.0f$'
         %(popt2[0], np.sqrt(pcov2[0,0]), popt2[1], np.sqrt(pcov2[1,1]), popt2[2],
           np.sqrt(pcov2[2,2]), popt2[3], np.sqrt(pcov2[3,3])),
         style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
           'pad':5})

plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(xu, xo)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Europium Doppelpeak')
plt.savefig('Grafik_Europium_peak1.pdf')
plt.show()

Calib[4]=ufloat(popt[2], popt[1])
Calib[5]=ufloat(popt2[2], popt2[1])

### Energiekalibrierung
Calib=np.asarray(Calib)
xfit=[0,2000]
xfit=np.asarray(xfit)

popt,pcov=opt.curve_fit(lin, E, unp.nominal_values(Calib),
                        sigma=unp.std_devs(Calib), absolute_sigma=True)

xu=0
xo=1500
yu=0
yo=1000

plt.plot(xfit, lin(xfit, *popt), 'r-', zorder=5, linewidth=2,
         label='Lineaer Regression')
plt.errorbar(E, unp.nominal_values(Calib), yerr=unp.std_devs(Calib), fmt='x',
             zorder=3, markersize=15, label='Messpunkte' )

```

```

plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=2)
plt.text(40, 650, '$a=%.0f \pm %.0f $ \n $b=(%.3f \pm %.3f)\mathrm{1/keV}$'
        %(popt[0],np.sqrt(pcov[0,0]),popt[1],np.sqrt(pcov[1,1])),
        style='italic',
        bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1, 'pad':5})
plt.xlabel('Druck [Pa]')
plt.xlabel('Energie [keV]')
plt.ylabel('Channel')
plt.xlim(xu, xo)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Energiekalibrierung')
plt.savefig('Grafik_Energiekalibrierung.pdf')
plt.show()

```

```

a=ufloat(popt[0],np.sqrt(pcov[0,0]))
b=ufloat(popt[1],np.sqrt(pcov[1,1]))

```

```

### Tabelle

```

```

f= open('Tabelle_Calib.txt', 'w')
for i in range(0,len(Calib)):
    if i<2:
        f.write('Co& \t')
    elif i<4:
        f.write('Na& \t')
    else:
        f.write('Eu& \t')
    f.write('$')
    f.write(str(round(E[i],0)))
    f.write('$& \t $')
    f.write(str(Calib[i]))
    f.write('$ \\\ ' )
    f.write('\n')
f.close()

```

```

### Thorium komplett

```

```

plt.errorbar(Channel,unp.nominal_values(Thorium),yerr=unp.std_devs(Thorium),
             fmt='x', markersize=3,label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(0, 4096)
#plt.ylim(-100,1000)
plt.title('Thorium komplettes Spektrum')
plt.savefig('Grafik_Thorium_komplett.pdf')
plt.show()

```

```

### Thorium 1

```

```

Th1=Thorium[63:71]
Ch1=Channel[63:71]
popt,pcov=opt.curve_fit(gauss, Ch1, unp.nominal_values(Th1),
                       p0=[15000,5,66,25000], sigma=unp.std_devs(Th1),
                       absolute_sigma=True)

```

```

xu=40
xo=100
yu=0
yo=200000

plt.plot(Ch1, gauss(Ch1, *popt), 'r-', zorder=5, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 1')
plt.errorbar(Channel, unp.nominal_values(Thorium), yerr=unp.std_devs(Thorium),
            fmt='x', zorder=3, markersize=3, label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.text(xo-(xo-xu)*0.98, yo-(yo-yu)*0.25, '$A1=%.0f \pm %.0f$ \n' r'$\sigma 1'
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch1=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c1=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt[0], np.sqrt(pcov[0,0]), popt[1], np.sqrt(pcov[1,1]), popt[2],
          np.sqrt(pcov[2,2]), popt[3], np.sqrt(pcov[3,3])),
        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
          'pad':5})

plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(xu, xo)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Thorium 1. Peak')
plt.savefig('Grafik_Thorium_peak1.pdf')
plt.show()

```

```
Thor[0]=ufloat(popt[2], popt[1])
```

```
### Thorium 2
```

```

Th1=Thorium[85:100]
Ch1=Channel[85:100]
popt,pcov=opt.curve_fit(gauss, Ch1, unp.nominal_values(Th1),
                       p0=[5000,5,95,25000], sigma=unp.std_devs(Th1),
                       absolute_sigma=True)

Th2=Thorium[110:125]
Ch2=Channel[110:125]
popt2,pcov2=opt.curve_fit(gauss, Ch2, unp.nominal_values(Th2),
                          p0=[36000,8,116,28000], sigma=unp.std_devs(Th2),
                          absolute_sigma=True)

```

```

xu=80
xo=150
yu=20000
yo=75000

```

```

plt.plot(Ch1, gauss(Ch1, *popt), 'r-', zorder=5, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 2')
plt.plot(Ch2, gauss(Ch2, *popt2), 'm--', zorder=6, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 3')
plt.errorbar(Channel, unp.nominal_values(Thorium), yerr=unp.std_devs(Thorium),
            fmt='x', zorder=3, markersize=3, label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.text(xo-(xo-xu)*0.98, yo-(yo-yu)*0.25, '$A2=%.0f \pm %.0f$ \n' r'$\sigma 2'
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch2=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c2=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt[0], np.sqrt(pcov[0,0]), popt[1], np.sqrt(pcov[1,1]), popt[2],
          np.sqrt(pcov[2,2]), popt[3], np.sqrt(pcov[3,3])),

```

```

        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
                                         'pad':5})
plt.text(xo-(xo-xu)*0.98, yo-(yo-yu)*0.54, '$A3=%.0f \pm %.0f$ \n' r'\sigma 3'
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch3=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c3=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt2[0],np.sqrt(pcov2[0,0]),popt2[1],np.sqrt(pcov2[1,1]),popt2[2],
        np.sqrt(pcov2[2,2]),popt2[3],np.sqrt(pcov2[3,3])),
        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
                                         'pad':5})

plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(xu, xo)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Thorium 2. und 3. Peak')
plt.savefig('Grafik_Thorium_peak2.pdf')
plt.show()

Thor[1]=ufloat(popt[2],popt[1])
Thor[2]=ufloat(popt2[2],popt2[1])

### Thorium 3
Th1=Thorium[165:180]
Ch1=Channel[165:180]
popt,pcov=opt.curve_fit(gauss, Ch1, unp.nominal_values(Th1),
                        p0=[70000,7,176,30000], sigma=unp.std_devs(Th1),
                        absolute_sigma=True)

Th2=Thorium[190:210]
Ch2=Channel[190:210]
popt2,pcov2=opt.curve_fit(gauss, Ch2, unp.nominal_values(Th2),
                           p0=[100000,10,198,50000], sigma=unp.std_devs(Th2),
                           absolute_sigma=True)

xu=140
xo=230
yu=25000
yo=200000

plt.plot(Ch1, gauss(Ch1, *popt), 'r-', zorder=5, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 4')
plt.plot(Ch2, gauss(Ch2, *popt2), 'm--', zorder=6, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 5')
plt.errorbar(Channel,unp.nominal_values(Thorium),yerr=unp.std_devs(Thorium),
             fmt='x', zorder=3, markersize=3,label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='-')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='-', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=1)
plt.text(xo-(xo-xu)*0.98, yo-(yo-yu)*0.25, '$A4=%.0f \pm %.0f$ \n' r'\sigma 4'
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch4=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c4=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt[0],np.sqrt(pcov[0,0]),popt[1],np.sqrt(pcov[1,1]),popt[2],
        np.sqrt(pcov[2,2]),popt[3],np.sqrt(pcov[3,3])),
        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
                                         'pad':5})

plt.text(xo-(xo-xu)*0.98, yo-(yo-yu)*0.54, '$A5=%.0f \pm %.0f$ \n' r'\sigma 5'
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch5=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c5=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt2[0],np.sqrt(pcov2[0,0]),popt2[1],np.sqrt(pcov2[1,1]),
        popt2[2],np.sqrt(pcov2[2,2]),popt2[3],np.sqrt(pcov2[3,3])),
        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
                                         'pad':5})

plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(xu, xo)

```

```

plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Thorium 4. und 5. Peak')
plt.savefig('Grafik_Thorium_peak3.pdf')
plt.show()

Thor[3]=ufloat(popt[2],popt[1])
Thor[4]=ufloat(popt2[2],popt2[1])

### Thorium 4
Th1=Thorium[250:270]
Ch1=Channel[250:270]
popt,pcov=opt.curve_fit(gauss, Ch1, unp.nominal_values(Th1),
                        p0=[6000000,15,253,25000], sigma=unp.std_devs(Th1),
                        absolute_sigma=True)

Th2=Thorium[280:310]
Ch2=Channel[280:310]
popt2,pcov2=opt.curve_fit(gauss, Ch2, unp.nominal_values(Th2),
                           p0=[400000,30,295,10000], sigma=unp.std_devs(Th2),
                           absolute_sigma=True)

xu=230
xo=340
yu=0
yo=100000

plt.plot(Ch1, gauss(Ch1, *popt), 'r-', zorder=5, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 6')
plt.plot(Ch2, gauss(Ch2, *popt2), 'm--', zorder=6, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 7')
plt.errorbar(Channel,unp.nominal_values(Thorium),yerr=unp.std_devs(Thorium),
             fmt='x', zorder=3, markersize=3,label='Messpunkte' )
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='--')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='--', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=9)
plt.text(xo-(xo-xu)*0.26, yo-(yo-yu)*0.25, '$A6=%.0f \pm %.0f$ \n' r'$\sigma 6'$
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch6=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c6=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt[0],np.sqrt(pcov[0,0]),popt[1],np.sqrt(pcov[1,1]),popt[2],
          np.sqrt(pcov[2,2]),popt[3],np.sqrt(pcov[3,3])),
        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
          'pad':5})
plt.text(xo-(xo-xu)*0.26, yo-(yo-yu)*0.54, '$A7=%.0f \pm %.0f$ \n' r'$\sigma 7'$
        '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch7=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c7=%.0f \pm %.0f$'
        %(popt2[0],np.sqrt(pcov2[0,0]),popt2[1],np.sqrt(pcov2[1,1]),popt2[2],
          np.sqrt(pcov2[2,2]),popt2[3],np.sqrt(pcov2[3,3])),
        style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
          'pad':5})

plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(xu, xo)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Thorium 6. und 7. Peak')
plt.savefig('Grafik_Thorium_peak4.pdf')
plt.show()

Thor[5]=ufloat(popt[2],popt[1])
Thor[6]=ufloat(popt2[2],popt2[1])

### Thorium 5
Th1=Thorium[400:435]
Ch1=Channel[400:435]

```

```

popt,pcov=opt.curve_fit(gauss, Ch1, unp.nominal_values(Th1),
                        p0=[400000,18,420,2000], sigma=unp.std_devs(Th1),
                        absolute_sigma=True)

Th2=Thorium[570:620]
Ch2=Channel[570:620]
popt2,pcov2=opt.curve_fit(gauss, Ch2, unp.nominal_values(Th2),
                           p0=[600000,11,590,100], sigma=unp.std_devs(Th2),
                           absolute_sigma=True)

xu=390
xo=700
yu=0
yo=11000

plt.plot(Ch1, gauss(Ch1, *popt), 'r-', zorder=5, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 8')
plt.plot(Ch2, gauss(Ch2, *popt2), 'm--', zorder=6, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 9')
plt.errorbar(Channel, unp.nominal_values(Thorium), yerr=unp.std_devs(Thorium),
             fmt='x', zorder=3, markersize=3, label='Messpunkte')
plt.grid(b=True, which='major', color='k', linestyle='--')
plt.grid(b=True, which='minor', color='k', linestyle='--', alpha=0.4)
plt.minorticks_on()
plt.legend(loc=2)
plt.text(xo-(xo-xu)*0.26, yo-(yo-yu)*0.25, '$A8=%.0f \pm %.0f$ \n' r'$\sigma 8$'
         '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch8=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c8=%.0f \pm %.0f$'
         %(popt[0], np.sqrt(pcov[0,0]), popt[1], np.sqrt(pcov[1,1]), popt[2],
           np.sqrt(pcov[2,2]), popt[3], np.sqrt(pcov[3,3])),
         style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
           'pad':5})
plt.text(xo-(xo-xu)*0.26, yo-(yo-yu)*0.54, '$A9=%.0f \pm %.0f$ \n' r'$\sigma 9$'
         '=%.1f \pm %.1f$ \n' '$Ch9=%.2f \pm %.2f$ \n' '$c9=%.0f \pm %.0f$'
         %(popt2[0], np.sqrt(pcov2[0,0]), popt2[1], np.sqrt(pcov2[1,1]), popt2[2],
           np.sqrt(pcov2[2,2]), popt2[3], np.sqrt(pcov2[3,3])),
         style='italic', fontsize=8, bbox={'facecolor':'white', 'alpha':1,
           'pad':5})

plt.xlabel('Channel')
plt.ylabel('Ereignisse')
plt.xlim(xu, xo)
plt.ylim(yu, yo)
plt.title('Thorium 8. und 9. Peak')
plt.savefig('Grafik_Thorium_peak5.pdf')
plt.show()

Thor[7]=ufloat(popt[2], popt[1])
Thor[8]=ufloat(popt2[2], popt2[1])

### Thorium 6
Th1=Thorium[1730:1870]
Ch1=Channel[1730:1870]
popt,pcov=opt.curve_fit(gauss, Ch1, unp.nominal_values(Th1),
                        p0=[14000,30,1790,0], sigma=unp.std_devs(Th1),
                        absolute_sigma=True)

xu=1600
xo=2000
yu=-100
yo=1000

plt.plot(Ch1, gauss(Ch1, *popt), 'r-', zorder=5, linewidth=2,
         label='Gauss-Fit 10')

```

Literatur

- [1] Jkrieger-Gemeinfrei [<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=732808>](abgerufen am 07.10.17)
- [2] Versuchsanleitung, Fortgeschrittenen Praktikum Teil 1- Szintillationszähler [http://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/fp/Versuche/FP1/FP1-3-Szintillationszaehler/AnleitungSzintillator_deutsch.pdf] (called on: 02.10.17)
- [3] Versuche zur Radioaktivität im Physikalischen Fortgeschrittenen Praktikum an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg- Tobias Kotyk [<http://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/fp/Versuche/FP1/FP1-7-LangeHalbwertzeiten/Staatsex-Lange-Hwz.pdf>] (called on: 02.10.17)