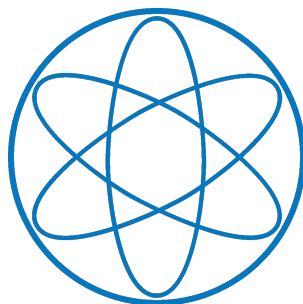


Anfängerpraktikum Teil 3

(Optik und Atomphysik)

Radioaktivität



Block B, Kurs 3, Gruppe 1, Team 2:

Eduard Koller

Michael Labenbacher

Fakultät für Physik

Technische Universität München

1. Einleitung	1
2. Verwendete Methoden	1
2.1. Funktionsweise des NaI-Szintillationszähler	1
2.2. Mathematische Methoden	1
3. Experimentelles Vorgehen	2
4. Auswertung der Messergebnisse	3
4.1. Fehlerbetrachtung	3
4.2. Aufnahme von Eichspektren	3
4.3. Strahlenbelastung durch das ^{137}Cs -Präparat	4
4.4. Untergrundstrahlung und Bleiabschirmung	5
4.5. Kalium-Probe	6
4.6. Tschernobyl, Uran, Thorium und Pilz-Probe	7
4.7. Strahlenbelastung durch das Molke-Präparat	10
4.8. Höhenstrahlung	10
5. Fragen	12
Anhang	15
A. Fehlerrechnung	15
A.1. Eichgeraden und Fits	15
B. Literaturverzeichnis	16

Mittwoch 6. März, 2019

1. Einleitung

In diesem Versuch wird die radioaktive Strahlung von verschiedenen Proben untersucht. Dazu wird das Gammaspektrum dieser aufgenommen, analysiert und die Abschirmwirkung von Blei, so wie die Höhenstrahlung gemessen.

2. Verwendete Methoden

2.1. Funktionsweise des NaI-Szintillationszähler

Ein Szintillationszähler ist zum Nachweis von γ -Quanten aus radioaktiven Zerfällen gedacht, er ist hier ein Kristall (NaI-Gitter) mit eingelagertem Thallium. Findet nun ein radioaktiver Zerfall in der Probe statt, so werden γ -Quanten mit diskreten Energien ausgesendet. Nun sind zwei (1,2) Wechselwirkungen mit dem Kristall und ein Effekt (3) näher zu betrachten:

1. Photoeffekt

Die einfallenden Photonen lösen Elektronen aus dem NaI aus. (Verlust durch die Austrittsarbeit W_A ist vernachlässigbar, da $E_e \gg W_A$ gilt. Die direkte Proportionalität zwischen Photonen-Elektronenenergie bleibt deshalb erhalten.) Das schnelle Elektron regt anschließend das eingelagerte Thallium an, welches die Anregungsenergie in Form von Photonen wieder abgibt. Diese Photonen reagieren zum Schluss mittels des Photoeffektes an der Metallplatte des Photomultipliers und erzeugen somit ein Signal, dessen Stromstärke direkt proportional zu der des einfallenden γ -Quants ist. Diesen Effekt beobachtet man als Photolinie in den Messdaten.

2. Comptoneffekt

Für niedrig-energetischere Photonen besteht die Möglichkeit der Wechselwirkung mittels des Comptoneffektes. Dabei wird Energie auf das Elektron im NaI übertragen, dieses wird dann im Detektor nachgewiesen. Diesen Effekt kann als Comptongeberge in den Messdaten beobachtet werden.

3. Paarbildung

Ist die Energie des γ -Quants größer als 1022 keV, so kann es zur Positron-Elektron Paarbildung kommen. Diese annihilieren sofort wieder und erzeugen zwei weitere Photonen der Energie 511 keV. Von den insgesamt drei Photonen können drei, zwei (single escape) oder eins (double escape) registriert werden. (single/double escape: Eins/Zwei der durch die Anihilation entstandenen Photonen verlassen den Detektor.) Diesen Effekt beobachtet man als single/double escape-peak.

2.2. Mathematische Methoden

Beim radioaktiven Zerfall kann man nur rein statistische Aussagen treffen, da Teilchenzerfälle zufällig sind. Man erwartet zum Zeitpunkt t eine Anzahl N von noch vorhandenen Kernen nach dem Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2.1)$$

welche von der Anfangszahl $N_0 = N(0)$ der vorhandenen Kerne und der Zerfallskonstante

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}, \quad (2.2)$$

mit $T_{1/2}$ als Halbwertszeit, abhängt. Von Interesse ist die Aktivität, welche die Anzahl der Zerfälle pro Zeit angibt. Aus dem Zerfallsgesetz 2.1 erhält man:

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2.3)$$

wobei man λN_0 zur Anfangsaktivität $A_0 = A(0)$ zusammenfasst.

3. Experimentelles Vorgehen

Der Versuchsaufbau (skizziert in Abbildung 3.1) besteht im Wesentlichen aus

Abbschirmung - Probe - NaI-Szintillationszähler - Photomultiplier - Elektronik - PC,

wobei die Probe wie auch die Abbschirmung versuchsabhängig gewählt werden.

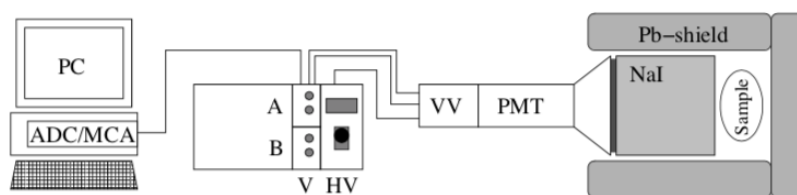


Abbildung 3.1.: Versuchsaufbau, bestehend aus: PB-Shield: Abbschirmung, sample: Messprobe, NaI: Szintillationszähler, PMT: Photomultiplier, VV, HV, V, ADC/MCA: Elektronik (Verstärker, Digital-Analog-Converter)

Zum Aufnehmen der Messwerte ist eine Eichung der Messsoftware zwischen Kanalnummer n und Energie E vorzunehmen. Dabei ist darauf Acht zu geben, dass die 1333 keV von ^{60}Co unterhalb des Kanals 500 ist, damit die zukünftigen Messwerte im Messintervall liegen. Die Kanalnummer kann durch Verstellen der Beschleunigungsspannung des Photomultipliers angepasst werden, in diesem Teil des Experimentes empfiehlt sich eine Einstellung im Bereich von 800-900kV. Zur Erfassung der Messwerte wird die Software Cassy Lab benutzt. Die Eichmessung selber erfolgt mit Proben, bei denen die Energie des Photopeaks genau bekannt ist. Dazu werden die Proben ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs verwendet, die Peakenergien sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Zum Messen wird die man die Proben möglichst nah an den NaI-Szintillationszähler und nimmt das Spektrum über einen Zeitraum von 60 s, der Einfluss von Nachbarmessungen wird durch Aufstellen von Bleiblöcken minimiert.

Die Untergrundmessung erfolgt einmal komplett ohne Blei und einmal mit Blei ummantelt, beide male ohne Probe, über einen Zeitraum von 600 s. Die Messungen der folgenden Proben (Kaliumcarbonat (K_2CO_3), Molke von 1986 aus Bayern, Uran, Thorium, Pilze aus Oberbayern und Mecklenburg) erfolgt jeweils über einen Zeitraum von 600 s sowie unter Bleiabschirmung, da einige Proben sehr schwach strahlen.

Um die Höhenstrahlung messen zu können muss die Eichskala neu eingestellt werden. Um die höheren Energien zu erfassen wird die Beschleunigungsspannung verringert, anschließend geeicht. Die Höhenstrahlung wird ohne Abschirmung über einen Zeitraum von 600 s gemessen.

4. Auswertung der Messergebnisse

4.1. Fehlerbetrachtung

Systematische Abweichungen, bedingt durch den Aufbau, von der Kanalnummer n sind im gegensatz zu den statistischen Schwankungen vernachlässigbar klein. Weitere Fehlerrechnungen und -fortpflanzungen sind dem Anhang A zu entnehmen und bei der Beantwortung der „Fragen“ von der Anleitung [1] wird keine Fehlerrechnung betrieben, da es sich größtenteils um Abschätzungen handelt.

4.2. Aufnahme von Eichspektren

Nach Einstellung der Hochspannung auf ca. 0.83 kV, Aufnahme der Eichspektren in Abbildung 4.1 und Analyse der Kanäle der erwarteten Peaks, siehe Tabelle 4.1, wurde die Eichgerade mit Hilfe eines linearen Fits (mit x -Fehlern aus den Fits) in Abbildung 4.2 bestimmt.

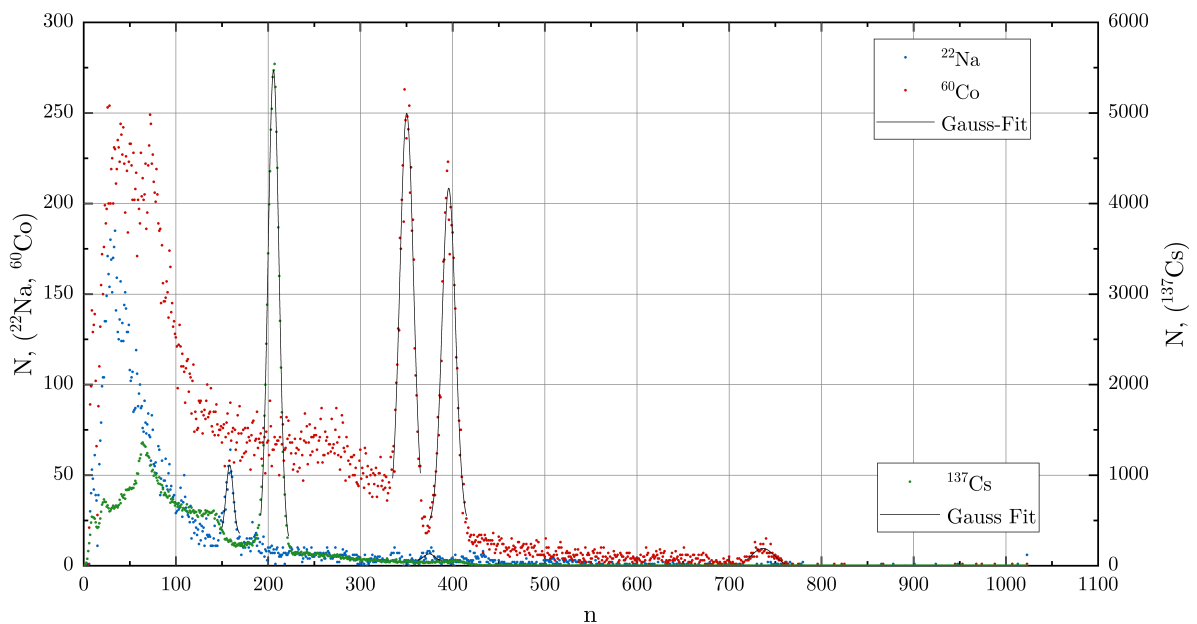
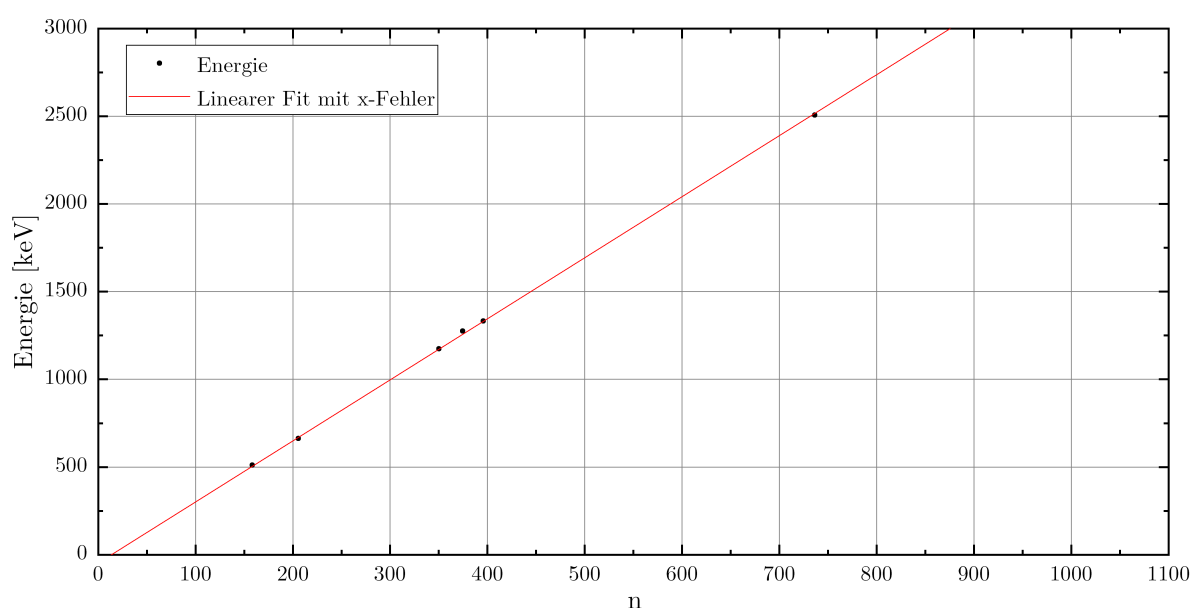


Abbildung 4.1.: Anzahl der Ereignisse N von den Eichproben ^{60}Co , ^{22}Na und ^{137}Cs in der Messzeit $t = 60\text{ s}$. Die Kanalnummer des Maximums und die verwendeten Intervalle der Fits (Gauss - Origin) sind in Tabelle 4.1 zu finden. Bei der ^{22}Na Probe waren die 511 keV- und 1275 keV-Linie erkennbar, für die 1787 keV-Linie (geringere Detektionswahrscheinlichkeit) war die Messzeit zu gering. Für ^{60}Co konnten beide γ -Quanten beim β^- -Zerfall, sowie deren Summe analysiert werden und bei ^{137}Cs die Linie für den β^- -Zerfall, siehe Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1.: Fit-Intervalle, Kanalnummer n der Peaks und zugehörige, theoretisch erwartete Energien. [1]

Probe	Fit-Intervall	n	Δn_{stat}	E keV
^{22}Na	[150, 160]	158.24	0.27	511
	[362, 392]	374.6	1.3	1 275
^{60}Co	[335, 365]	350.18	0.19	1 173
	[375, 415]	395.77	0.16	1 333
	[720, 760]	736.5	0.9	2 506
^{137}Cs	[192, 222]	205.77	0.05	662

**Abbildung 4.2.:** Eichgerade aus den Peaks in Abbildung 4.1 von ^{60}Co , ^{22}Na und ^{137}Cs gelistet in Tabelle 4.1. Die Linearisierung scheint bei Interpolation gut erfüllt zu sein, wobei bei kleinen Kanalnummern sich Rauschen in der Elektronik bemerkbar machen und die Extrapolation nur bedingt Gültigkeit besitzt.

Die Umrechnung der Kanalnummern n in Energien E ergibt sich nach der Eichgerade in Abbildung 4.2 zu

$$E(n) = kn + p,$$

mit Steigung $k = (3.481 \pm 0.025) \text{ keV}$ und y -Achsenabschnitt $p = (-47 \pm 8) \text{ keV}$.

4.3. Strahlenbelastung durch das ^{137}Cs -Präparat

In diesem Abschnitt wird die Strahlenbelastung von ^{137}Cs , mit Halbwertszeit $T_{1/2} = 30.2 \text{ a}$ und $E_\gamma = 662 \text{ keV}$ [1], abgeschätzt, wenn man sich $R = 1 \text{ m}$ von der Quelle entfernt befindet

und die Aktivität von 1990 $A_0 = 333 \text{ kBq}$ betrug. Dabei wird eine Person mit Masse $m = 75 \text{ kg}$ angenommen und diese als Rechteck mit den Abmessungen $b = 0.4 \text{ m}$ (Breite) und $h = 1.7 \text{ m}$ (Höhe) angenähert, was nach der Oosterom-und-Strackee-Formel [2] auf einen Raumwinkel von $\Omega = 29.2^\circ$ führt. Nach Formel (2.3) und (2.2) folgt die heutige Aktivität zu $A(29 \text{ a}) = 171 \text{ kBq}$ und die gesamte absorbierte Energie und Strahlenbelastung beträgt

$$E_{\text{ges}} = \frac{\Omega}{4\pi} \int_{29 \text{ a}}^{30 \text{ a}} E_\gamma \cdot A(t) dt = 23.2 \text{ mJ} \quad \Rightarrow \quad H = \frac{E_{\text{ges}}}{m} = 0.31 \text{ mSv}$$

4.4. Untergrundstrahlung und Bleiabschirmung

Die Ergebnisse der Messungen mit bzw. ohne Bleiabschirmung sind in Abbildung 4.3 zu erkennen und es zeigt sich eine Detektionsrate N von ca. 176 bzw. sechs γ -Quanten pro Sekunde im gesamten Kanalbereich.

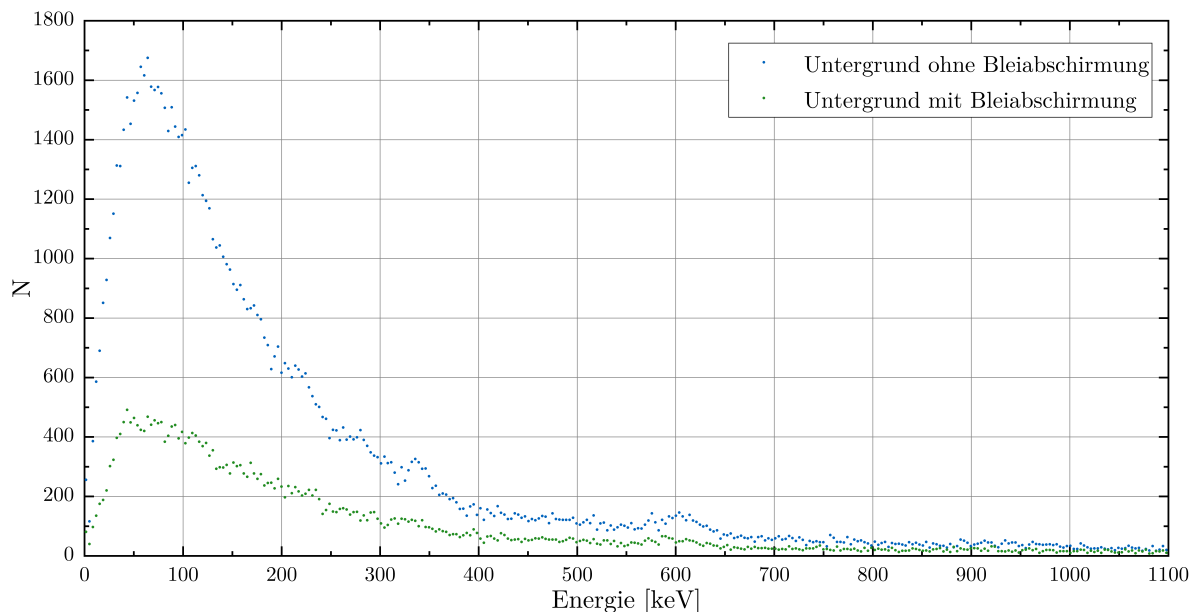


Abbildung 4.3.: Anzahl der detektierten Ereignisse N ohne einer Probe mit bzw. ohne Bleiabschirmung in der Messzeit $t = 600 \text{ s}$. Integration über das gesamte Spektrum liefert mit Blei $N = 36\,000$ bzw. ohne $N = 105\,789$. Bei der Messung mit Blei lässt sich die 77 keV von Blei, erläutert in Kapitel 5, erkennen.

Im Folgenden wird aus den Messwerten eine Abschätzung der jährlichen natürlichen Strahlenbelastung durch niederenergetische γ -Quanten durchgeführt, wobei eine mittlere Energie der γ -Quanten von $E_\gamma = 100 \text{ keV}$, eine 100 %-ige Nachweiswahrscheinlichkeit des Detektors und vollständige Absorption angenommen wird. In $t = 10 \text{ min}$ betrug die Anzahl detektierter γ -Quanten ohne Bleiabschirmung $N = 105\,789$. Dies führt auf eine Gesamtenergie von $E_{\text{ges}} = E_\gamma \cdot N \cdot \frac{1 \text{ a}}{t} = 8.8 \cdot 10^{-5} \text{ J/a}$. Der Detektor hat die Form eines Zylinders mit Höhe und

Durchmesser von 7.62 cm, Dichte 3.7 g/cm³ und hat somit eine Masse von $m = 1.286$ kg. Die Äquivalentdosis folgt zu

$$H = \frac{E_{\text{ges}}}{m} = 68.4 \mu\text{Sv/a}$$

4.5. Kalium-Probe

Zur Bestimmung des Spektrums von Kaliumcarbonat K_2CO_3 wird das Spektrum des Untergrunds mit Bleiabschirmung von der Messung abgezogen, siehe Abbildung 4.4.

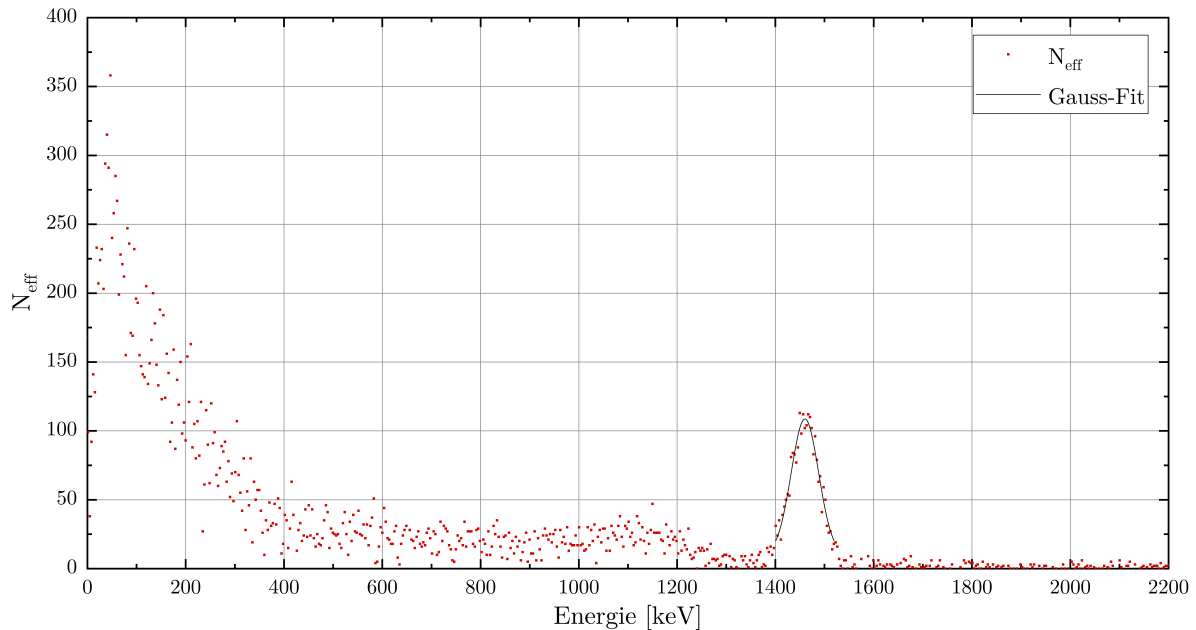


Abbildung 4.4.: Anzahl der effektiven Ereignisse N_{eff} von Kaliumcarbonat K_2CO_3 in der Messzeit $t = 600$ s. Der Fit (Gauss) im Intervall $[1400, 1520]$ keV liefert ein Maximum bei $E = (1460 \pm 13)$ keV. Bei der Probe war somit die 1461 keV-Linie von Kalium deutlich erkennbar und im niederenergetischen Bereich ist noch die K-Linie von Iod und Messrauschen überlagert. Des Weiteren lässt sich der lineare Verlauf der Compton-Streuung bis zur Kante bei ca. 1200 keV erkennen.

Integriert man über das Fit-Intervall, so erhält man eine Gesamtanzahl an Zerfällen von $N_{\text{eff}} = 2272/10$ min, was einer Aktivität von 3.79 Bq entspricht.

Aufgabe 4: [1] Nun wird eine theoretische Abschätzung der zu erwartenden Aktivität getroffen. Dazu wird die Gesamtmasse m der Probe von 100.34 g verwendet. Mit dem atomaren Molekülgewicht von $M = 138$ u = $2.29 \cdot 10^{-22}$ g erhält man eine Molekülanzahl von $N = \frac{M}{m} \approx 4.36 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Berücksichtigt man, dass in K_2CO_3 zwei Kaliumatome pro Moleküle vorliegen und nur 0.01 % davon radioaktiv sind, erhält man insgesamt eine Anzahl von $N = 8.76 \cdot 10^{19}$ radioaktiven Kernen zum Startzeitpunkt $t = 0$. Mit Gleichung 2.3 und einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 1.28 \cdot 10^9$ a folgt

$$A(t) = 1503 \cdot e^{-1.7 \cdot 10^{-17} t}$$

und man erwartet 901 800 Zerfälle in einer Beobachtungszeit von 600 s, was ungefähr das 400-fache der 2 272 zugeordneten Messwerte (im Intervall von $[1\,400, 1\,520]$ keV) entspricht. Berücksichtigt man jedoch, dass der Detektor nur ca. $1/8$ des gesamten Raumwinkels einnimmt, in denen die emittierten γ -Quanten fallen können, der Detektor nur ca. 20 % der γ -Quanten dieses Energiebereichs registriert und nur 11 % der Zerfälle bei ^{40}K β^+ -Zerfälle sind, so stimmt der nun erwartete Wert von 2 480 relativ gut mit dem gemessenen Wert überein.

Tabelle 4.2.: Mess- und Theoriewert der Energie von ^{40}K und Anzahl der Zerfälle, unter Berücksichtigung des Detektors (siehe Text).

	E keV	ΔE keV	A Bq
Messung	1 460	13	3,79
Theorie	1 461		4.13

4.6. Tschernobyl, Uran, Thorium und Pilz-Probe

In den folgenden Abbildungen sind die Messergebnisse von diversen Proben (Tschernobyl (Molke), Uran, Thorium und Pilze aus Oberbayern bzw. Mecklenburg) dargestellt und erläutert. Dabei wurden die gezählten Ereignisse pro Kanal von der Untergrundstrahlung mit Bleiabschirmung abgezogen und statt N nun der effektive Wert N_{eff} aufgetragen.

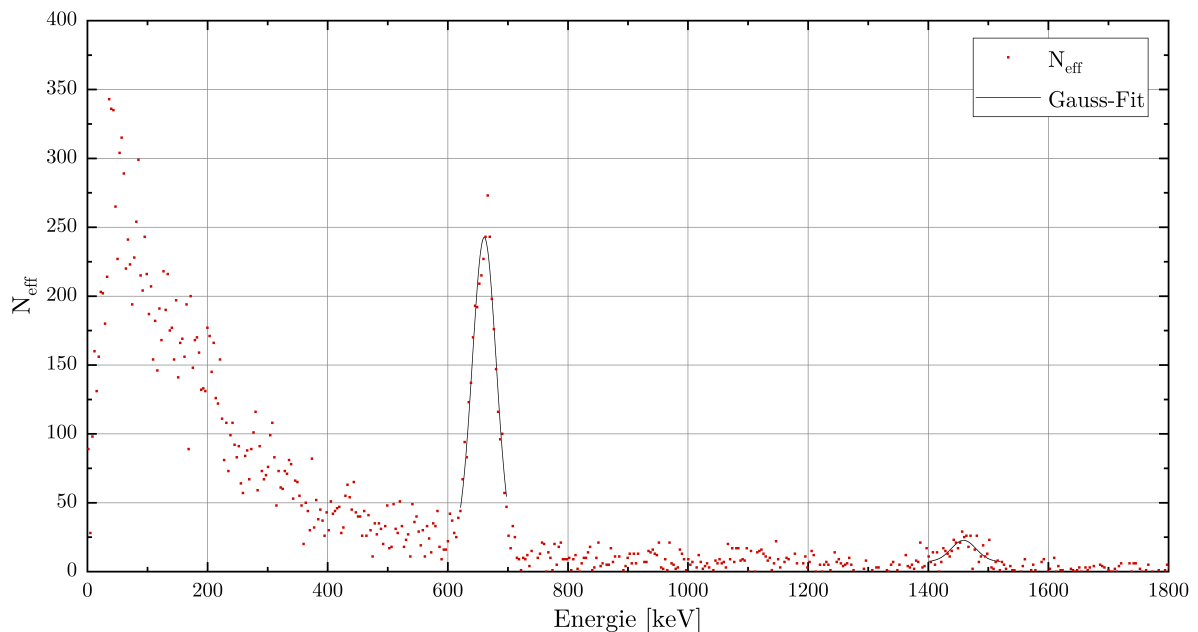


Abbildung 4.5.: Anzahl der effektiv detektierten Ereignisse N_{eff} gegen die Energie E der Tschernobyl-Probe in der Messzeit $t = 600$ s aufgetragen. Es wurde Molke verwendet, was den Peak bei Kalium (^{40}K , 1 461 keV) erklärt.

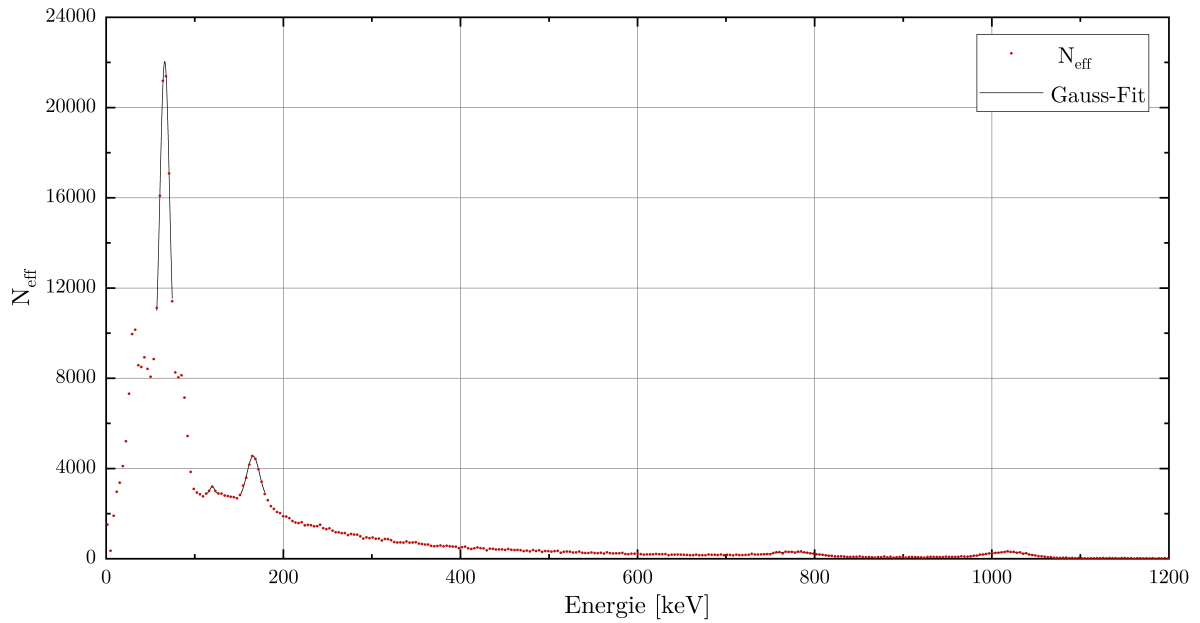


Abbildung 4.6.: Anzahl der effektiv detektierten Ereignisse N_{eff} gegen die Energie E der Uran-Probe in der Messzeit $t = 600\text{ s}$ aufgetragen. Zusätzlich zu den gefitteten Peaks, in Tabelle 4.3, sind Erhöhungen bzw. Ansammlungen im Bereich von 30 bis 55 keV bzw. von 80 bis 90 keV erkennbar, was auf ^{238}U bzw. ^{234}Th schließen lässt. (Fit nicht möglich.)

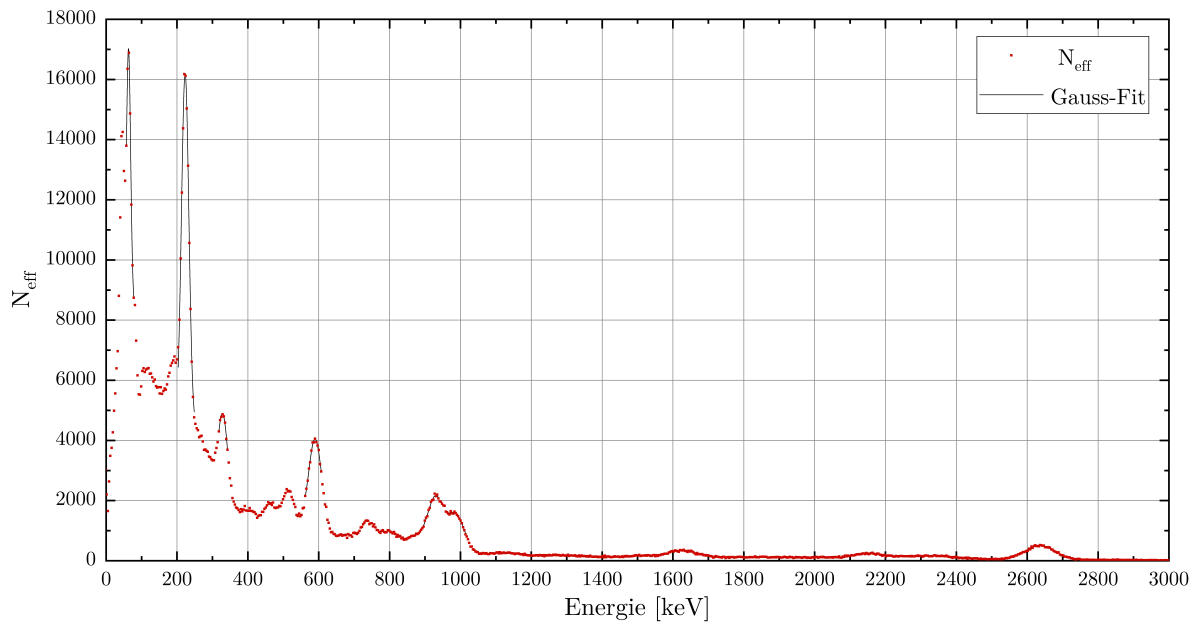


Abbildung 4.7.: Anzahl der effektiv detektierten Ereignisse N_{eff} gegen die Energie E der Thorium-Probe in der Messzeit $t = 600\text{ s}$ aufgetragen. Zusätzlich zu den gefitteten Peaks, in Tabelle 4.3 sind Peaks bei 480, 555 bzw. 735 keV erkennbar, was auf gleichzeitige Detektierung von ^{224}Ra und ^{212}Pb , ^{208}Tl bzw. ^{212}Bi schließen lässt. (Fit nicht möglich.)

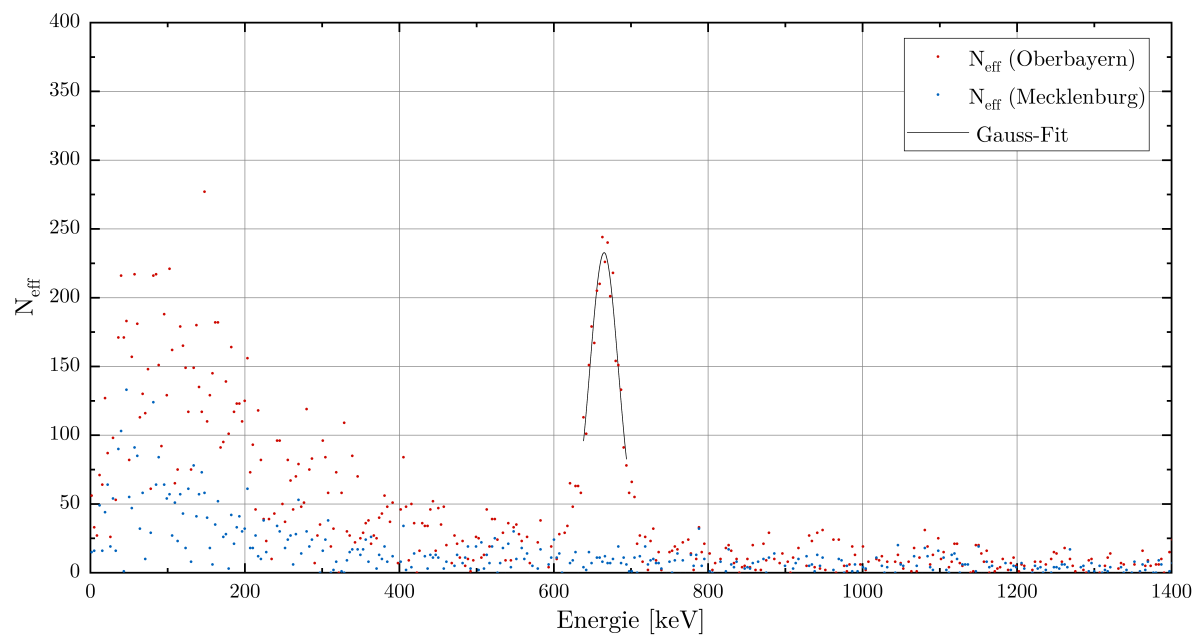


Abbildung 4.8.: Anzahl der effektiv detektierten Ereignisse N_{eff} gegen die Energie E der Pilze aus Oberbayern und Mecklenburg in der Messzeit $t = 600\text{ s}$ aufgetragen. Eine kurze Recherche im Internet bestätigt die Verstrahlung von Pilzen in Oberbayern.

Tabelle 4.3.: Probe, durch Vergleich mit den Zerfallsreihen gefundene Isotope (, entweder durch Fit mit Energiewert oder ohne und Erläuterung in der zugehörigen Abbildung), welche die Strahlung verursachen, Energie des γ -Quants und kurze Begründung.

Probe	Isotop	Fit-Intervall keV	Messwert		Theorie	Begründung
			E keV	ΔE keV	E keV	
Tschernobyl (Molke)	^{137}Cs	[620, 700]	660	9	662	β^- -Zerfall
	^{40}K	[1 400, 1 520]	1 458	13	1 461	β^+ -Zerfall
^{238}U	^{238}U				50	α -Zerfall
	^{234}Th	[55, 75]	66	8	63	β^- -Zerfall
	^{234}Pa	[734, 814]	774	10	767	β^- -Zerfall
	^{234}Pa	[977, 1 057]	1 017	11	1 001	β^- -Zerfall
^{232}Th	^{220}Rn	[55, 80]	63	8	64	α -Zerfall
	^{224}Ra	[200, 250]	222	8	241	α -Zerfall
	^{212}Pb	[200, 250]	222	8	239	β^- -Zerfall
	^{228}Ac	[315, 345]	328	8	339	β^- -Zerfall
	$^{224}\text{Ra} + ^{212}\text{Pb}$				480	(241 + 239)keV gleichzeitig
	^{208}Tl	[560, 610]	589	9	583	β^- -Zerfall
	^{212}Bi				727	α, β^- -Zerfall

Probe	Isotop	Fit-Intervall keV	Messwert		Theorie	Begründung
			E keV	ΔE keV	E keV	
	^{228}Ac	[880, 940]	930	11	911	β^- -Zerfall
	^{228}Ac	[940, 1 020]	977	11	969	β^- -Zerfall
	^{208}Tl				1 593	double-escape
	oder	[1 580, 1 700]	1 624	14	oder	oder
	$^{212}\text{Bi} + ^{228}\text{Ac}$				1 638	(727 + 911)keV
	^{208}Tl	[2 100, 2 220]	2 104	18	2 104	gleichzeitig
	^{208}Tl	[2 540, 2 740]	2 635	21	2 615	single-escape
						β^- -Zerfall
Pilze	^{137}Cs	[636, 696]	662	10	662	β^- -Zerfall

4.7. Strahlenbelastung durch das Molke-Präparat

Im Folgenden wird die Strahlenbelastung durch γ -Strahlung von der verwendeten Molke-Probe in Abbildung 4.5 berechnet, falls man die Probe essen würde. Dabei wird angenommen, dass die Probe ca. eine Woche im Körper bleibt, gleichmäßig verteilt ist, alle γ -Quanten absorbiert werden und die Person eine Masse von $m = 75 \text{ kg}$ besitzt. In der Abbildung 4.5 ist ein Peak von Cäsium und Kalium ersichtlich, wobei zweiterer zu gering ist, um aussagekräftige Anzahlen an Ereignissen bestimmen zu können, weshalb dieser nicht berücksichtigt wird. Es wurden in der Messzeit von $t = 600 \text{ s}$ insgesamt $N_{\text{eff}} = 486$, Fit-Intervall siehe Tabelle 4.3, γ -Quanten von ^{137}Cs mit durchschnittlich $E_\gamma = 662 \text{ keV}$ registriert. Dies führt auf eine Gesamtenergie von $E_{\text{ges}} = E_\gamma \cdot N_{\text{eff}} \cdot \frac{7\text{d}}{t} = 52 \text{ nJ}$ und für die Strahlenbelastung dieses Intervalls folgt

$$H = \frac{E_{\text{ges}}}{m} = 0.7 \text{ nSv}/7\text{d},$$

welche somit unbedenklich ist.

4.8. Höhenstrahlung

Nach Einstellung der Hochspannung auf ca. 0.52 kV, Aufnahme der Eichspektren in Abbildung 4.9 und Analyse der Kanäle der erwarteten Peaks, siehe Tabelle 4.4, wurde die Eichgerade mit Hilfe eines linearen Fits (mit x -Fehlern aus den Fits) analog zur Eichung in Abschnitt 4.2 bestimmt.

Tabelle 4.4.: Kanalnummer n der Peaks und zugehörige, theoretisch erwartete Energien. [1]

Probe	n	Energie keV
^{60}Co	23	1 173
	26	1 333
	49	2 506

Die Umrechnung der Kanalnummern n in Energien E ergibt sich für die Höhenstrahlung zu

$$E(n) = kn + p,$$

mit Steigung $k = (51.17 \pm 0.23)$ keV und y -Achsenabschnitt $p = (0 \pm 8)$ keV.

Im Anschluss auf die Eichung wurde 15 min die Höhenstrahlung gemessen, das Ergebnis der dafür interessanten Kanälen befindet sich in Abbildung 4.10 und die detektierten Ereignisse in den Kanalbereichen in 100-er Schritten ist der Tabelle 4.5 zu entnehmen.

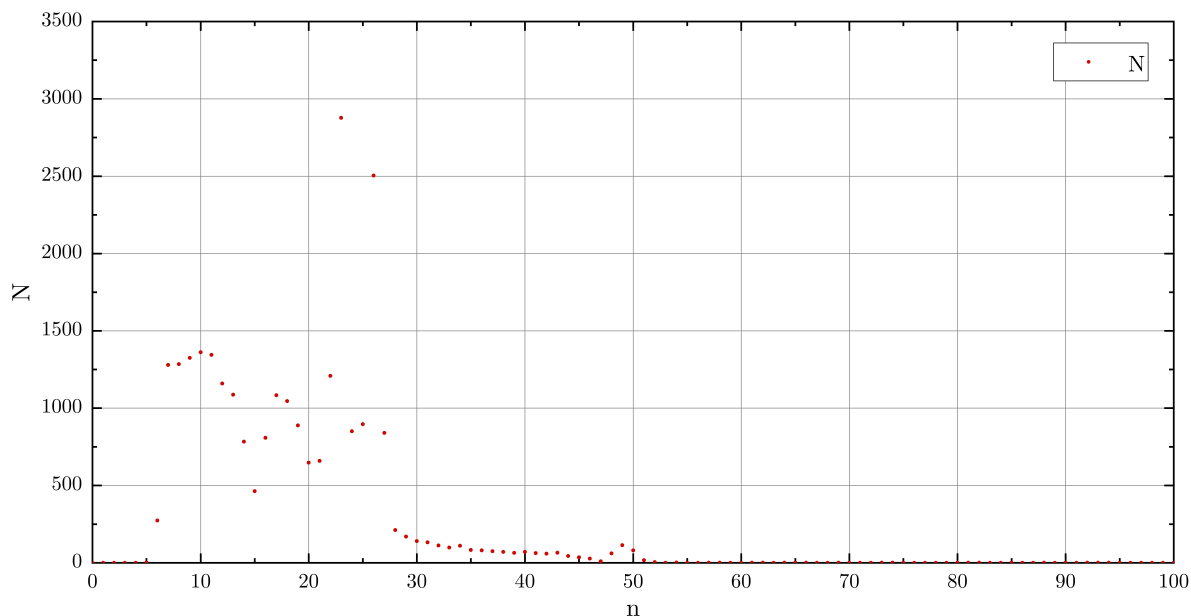


Abbildung 4.9.: Anzahl der Ereignisse N von der Eichprobe ^{60}Co in der Messzeit $t = 60$ s im Kanalbereich 0 bis 100. Es sind die drei charakteristischen Peaks von Cobalt bei den Kanälen diskretisiert erkennbar, können einfach abgelesen werden und die Kanalnummern der Maxima sind in Tabelle 4.4 zu finden.

Tabelle 4.5.: Detektierte Teilchenanzahlen und mittlere Energien der Kanalbereiche bei der Höhenstrahlungsmessung.

Kanalbereich	N	E MeV
100-199	259	7.65
200-299	151	12.77
300-399	155	17.88
400-499	150	23.00
500-599	158	28.12
600-699	188	33.23
700-799	153	38.35
800-899	73	43.47
900-999	35	48.58

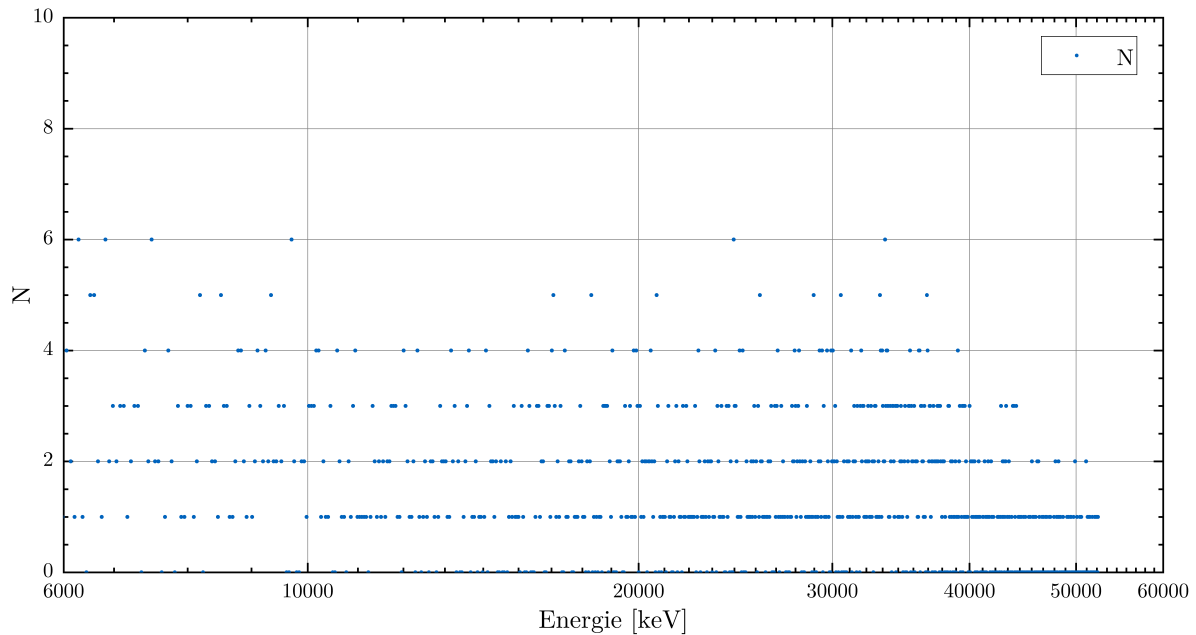


Abbildung 4.10.: Anzahl der Ereignisse N der Höhenstrahlung in der Messzeit $t = 15$ min in den Kanälen von ca. 100 bis 1023.

Für eine Abschätzung der Strahlenbelastung durch die Höhenstrahlung pro Jahr ergibt sich die Energie, die der Detektor durch einfallende Teilchen pro Jahr erhält, durch Mittlung der Werte in Tabelle 4.5, was auf $E_{\text{ges}} = 0.18 \text{ mJ}$ führt. Für die jährliche Strahlenbelastung des menschlichen Körpers durch Höhenstrahlung ergibt sich mit der Annahme, dass 1 kg des menschlichen Körpers dieselbe Energie wie 1 kg Detektormasse ($m_{\text{Kristall}} = 1286 \text{ kg}$, siehe Abschnitt 4.4) aufnimmt

$$S = \frac{E}{m_{\text{Kristall}}} = 0.14 \text{ mSv},$$

was in der erwarteten Größenordnung liegt.

5. Fragen

1. Wie ist die Einheit keV definiert? Drücken Sie die Energie des im Text erwähnten kosmischen Teilchens ($4 \cdot 10^{12} \text{ GeV}$) in Joule aus. Vergleichen Sie diese Energie mit Energien um Sie herum.

1 eV entspricht der Energie, die ein Elektron durch Beschleunigung in einem elektrischen Feld bekommt, wenn es eine Potentialdifferenz von 1 V überwindet. Mit der Elementarladung $e = 1.6021766208(98) \cdot 10^{-19} \text{ As}$ folgt $4 \cdot 10^{12} \text{ GeV} = 641 \text{ J}$ und eine 60 W-Glühbirne würde ca. 10.7 s leuchten, womit die Energie im Vergleich zum alltäglichen Leben relativ klein ist. [3]

2. Wieso haben die im Versuch beobachteten Peaks eine Breite? Warum werden nicht alle γ -Quanten einer ganz bestimmten Energie in einem einzigen Kanal gezählt? Was versteht man unter dem Begriff Halbwertsbreite?

Der Hauptgrund dürfte daran liegen, dass die einfallenden γ -Quanten beim Abgeben der Energie schließlich eine in gewissen Bereichen schwankende Anzahl an Elektronen erzeugen, deren Energieverteilung eine gewisse Breite aufweist. Des Weiteren entspricht jeder Kanal einem Energiebereich, Digitalisierung, Messunsicherheiten, Energieunschärfe und die γ -Quanten streuen auch mit Gasatomen in der Luft, bevor diese in den Kristall eindringen sind weitere kleinere Effekte, neben dem Rauschen der Messelektronik, vor allem durch Verwendung der Hochspannung. Die Halbwertsbreite ist die Breite wo der Funktionswert auf die Hälfte des Maximums abgefallen ist.

3. Erklären Sie, aus welchen Peaks sich das ^{22}Na -Spektrum zusammensetzt und woher sie kommen (z. B. die 511 keV-Linie).

Im Wesentlichen setzt sich das gemessene Spektrum aus drei Peaks zusammen:

- 511 keV: Beim β^+ -Zerfall wird das Positron abgebremst, reagiert mit einem Elektron und dabei werden zwei γ -Quanten mit diesem Energiebetrag in entgegengesetzte Richtungen ausgesandt, wobei eines vom Detektor registriert wird.
- 1 257 keV: Der beim β^+ -Zerfall entstandene, angeregte Kern geht in den Grundzustand über und dabei wird ein γ -Quant mit dieser Energie emittiert.
- 1 768 keV: Die beiden zuvor genannten γ -Quanten fallen in den Detektor fast gleichzeitig ein und werden als ein einziges Ereignis, mit der Summe der Energien, registriert.

4. Wieso ist in den Spektren eine Linie bei 77 keV zu sehen? (Hinweis: Bleiabschirmung)

Die freien Elektronen schlagen gebundene Blei-Elektronen aus den inneren Schalen (K) heraus und diese Lücke wird durch ein Elektron der äußeren Schale, unter Emission eines Photons mit dieser Energiedifferenz, geschlossen.

5. In der Einführung wurde darauf hingewiesen, dass die einzige Aussage, die man über den Zerfall von Atomkernen machen kann, statistischer Natur ist. Die statistische Unsicherheit, die Sie durch Zählen der Zerfälle machen, ist $\Delta n = \sqrt{n}$. Was bedeutet dies für hohe Zählraten?

Es handelt sich hier um die Poisson-Verteilung und betrachtet man den relativen Fehler so folgt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n}}{n} = 0.$$

Dies zeigt, dass durch Erhöhen der Zählrate die relative Abweichung unter jede Schranke gedrückt werden kann.

6. In einem frisch gereinigten langlebigen radioaktiven Präparat wie z. B. Ra steigt die Aktivität zunächst an. Bevor sich die Abnahme durch das Zerfallsgesetz bemerkbar macht, bleibt diese Aktivität jedoch lange Zeit nahezu konstant. Können

Sie sich dieses Verhalten erklären? Denken Sie an die Erzeugung von Tochterkernen und an deren Zerfall.

Die Aktivität von langlebigen Präparaten (z. B. Ra), dessen Zerfallsprodukte (teilweise) kurzlebig sind, steigt am Beginn, bis genau so viele Tochterkerne zerfallen, wie gebildet werden (Gleichgewicht). Nachdem dieser Zustand erreicht wurde, nimmt die Aktivität ab.

7. Wie kann α -, β - und γ -Strahlung abgeschirmt werden? Wie kosmische Strahlung?

α -Strahlung (Heliumkerne) besitzt eine geringe Reichweite in Materie (großes Ionisationsvermögen) und kann z. B. durch ein Stück Papier abgeschirmt werden. β und γ -Strahlung kann, wie z. B. im Versuch, durch Blei (bzw. allgemein Metall) abgeschirmt werden. Kosmische Strahlung ist eine hochenergetische Teilchenstrahlung (Myonen) und kann somit nur durch große Schichten an Material abgeschirmt werden, z. B. Laboratorium tief unter der Erde.

8. Warum sieht man bei Th Linien bei 2 615 keV, 2 104 keV und 1 593 keV?

In der Zerfallskette von Thorium findet sich ^{208}Tl und beim β^- -Zerfall wird ein γ -Quant der Energie 2 615 keV emittiert. Diese Energie ist größer als die Summe eines Positrons und Elektrons, womit Paarbildung möglich ist und diese Rekombinieren im Anschluss wieder. Verlassen dabei eins oder beide Quanten der Energie von 511 keV den Detektor, so wird nur die verbleibende Energie 2 104 keV bzw. 1 593 keV vom Detektor registriert (single- bzw. double escape peak).

9. Überlegen Sie sich Schritt für Schritt, was passiert, wenn ein γ -Quant in den NaI-Kristall fällt, absorbiert und schließlich in einen Kanal auf dem Bildschirm gezählt wird.

siehe Kapitel 2

A. Fehlerrechnung

A.1. Eichgeraden und Fits

Bei der Linearisierung in Abschnitt 4.2 ergibt sich der statistische Anteil durch quadratische Fehlerfortpflanzung der gefitteten Eichgeraden nach

$$\Delta E_{\text{stat}} = \sqrt{(\Delta k_{\text{stat}} n)^2 + \Delta p_{\text{stat}}^2}$$

Bei anschließenden Fits, zur Bestimmung von Peaks, überwiegt dieser Fehler relativ zur Unsicherheit des Mittelwerts vom Peak, weshalb zweiterer vernachlässigt wurde.

B. Literaturverzeichnis

- [1] *Radioaktivität (RAD)*. 2015. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap3/RAD.pdf> (besucht am 3. März 2019) (siehe S. 3–4, 6, 10).
- [2] A. Van Oosterom und J. Strackee. „The Solid Angle of a Plane Triangle“. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* BME-30.2 (1983), S. 125–126. ISSN: 0018-9294. DOI: [10.1109/TBME.1983.325207](https://doi.org/10.1109/TBME.1983.325207) (siehe S. 5).
- [3] CODATA. *Fundamentale Naturkonstanten*. 1994. URL: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html> (besucht am 3. März 2019) (siehe S. 12).