
Radioaktivität in der Umwelt

Ilja Homm und Thorsten Bitsch
Betreuer: Jonny Birkhan
20.12.2011



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fortgeschrittenen-Praktikum
Abteilung C

Inhalt

1	Einleitung	2
1.1	Ziel des Versuchs	2
1.2	Radioökologie	2
1.3	Physikalische Grundlagen	2
1.3.1	Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie	2
1.3.2	Halbleiter-Detektoren	3
2	Versuchsaufbau und -Durchführung	4
3	Auswertung	5
3.1	Energiekalibrierung	5
3.2	Energieauflösung	5
3.3	Hintergrundstrahlung	6
3.4	Nachweiswahrscheinlichkeit	7
3.5	türkischer Tee	9
3.6	Diskussion	10
3.7	Literatur	10
A	Anhang	12
A.1	Zerfallsschema von ^{40}K	12
A.2	Zerfall von ^{238}U	12
A.3	Zerfall von ^{235}U	13
A.4	Zerfall von ^{232}Th	13
A.5	Hintergrund	14
A.6	Aktivitäten am Praktikumstag	14
A.7	Germanium-Detektor	15

1 Einleitung

1.1 Ziel des Versuchs

Im vorliegenden Versuch soll türkischer Tee, welcher im Jahre 1986 (siehe Reaktorkatastrophe von Tschernobyl) erzeugt wurde, radioökologisch mit einem High-Purity Germanium-Detektor (HPGe), also einem hochauflösendem Reinstgermanium-Detektor, untersucht werden. Finales Ziel dieser Untersuchung soll eine Bewertung zur Schädlichkeit des Tees sein.

1.2 Radioökologie

In der Radioökologie wird zwischen natürlichen und anthropogenen radioaktiven Nukliden unterschieden. Quellen für natürlich vorkommende Radioaktivität sind die allgegenwärtige Höhenstrahlung, welche hauptsächlich aus schnellen Protonen besteht und in der Erdatmosphäre zu Kernreaktionen führt. Prominentestes Beispiel hierfür ist die Umwandlung von N_2 zu ^{14}C , was für die Altersbestimmung von organischen Stoffen genutzt wird. Außerdem befinden sich in der Erdkruste nach wie vor radioaktive Nuklide, die bei der Nukleosynthese vor der Entstehung der Erde erzeugt wurden. Da im Laufe der Erdgeschichte nur noch sehr langlebige radioaktive Nuklide übrig geblieben sind, finden sich hauptsächlich noch ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U , und ^{40}K und deren Zerfallsprodukte auf der Erde. Das prominenteste Beispiel für menschengemachte Radioaktivität ist ^{137}Cs , welches bei der Kernspaltung entsteht. Gerade bei Reaktorkatastrophen und Kernwaffeneinsätzen gerät dieses Isotop in die Umwelt und sorgt für eine erhöhte Radioaktivität.

1.3 Physikalische Grundlagen

1.3.1 Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie

γ -Strahlung entsteht im Wesentlichen durch vorhergegangene radioaktive Zerfälle, wie z.B. α - oder β -Zerfall, bei denen sich das Tochternuklid immernoch in einem angeregten Zustand befindet und durch Emission von Gammaquanten in den Grundzustand übergeht. Im Anhang sind die Zerfallsreihen von einigen Elementen aufgelistet, bei deren Zerfall bestimmte γ -Energien frei werden. Treffen Gammastrahlen auf Materie, so kann es zu folgenden Wechselwirkungen kommen:

- Photoeffekt: Dieser Effekt dominiert bei Energien unter 100 keV. Dabei löst ein γ -Quant ein Elektron aus der Atomhülle und verliert seine eigene Energie.
- Compton-Effekt: Bei Energien von einigen MeV tritt vorwiegend dieser Effekt auf, wobei ein Gammastrahl an Elektronen gestreut wird und weitere Compton- oder Photoeffekte verursachen kann.
- Paarbildungseffekt: Bei Energien über 1022 keV kann es zur Paarbildung kommen. Ein γ -Quant wird im elektromagnetischen Feld eines Atomkerns zerstört und es entstehen ein Elektron und ein Positron, die ihrerseits weiter ionisieren können. Trifft allerdings ein Positron auf ein Elektron, so entstehen wieder zwei γ -Quanten mit jeweils einer Energie von 511 keV. Diese Photonen können ihre Energie entweder durch weitere Photoeffekte abgeben und somit den Photopeak vergrößern, oder aber es tritt ein Photon aus dem Detektor

aus, sodass nur die Primärenergie abzüglich der Energie des einen Quants ($E_{SE} = E_{\gamma,0} - 511$ keV) übrig bleibt und zum Single-Escape-Peak beiträgt. Treten beide Quanta aus dem Detektor, so gibt es einen Beitrag zum Double-Escape-Peak und von der vollen Primärenergie müssen die Energien beider Quanta abgezogen werden ($E_{DE} = E_{\gamma,0} - 1022$ keV).

Zum besseren Verständnis der Peaks dient das folgende Spektrum:

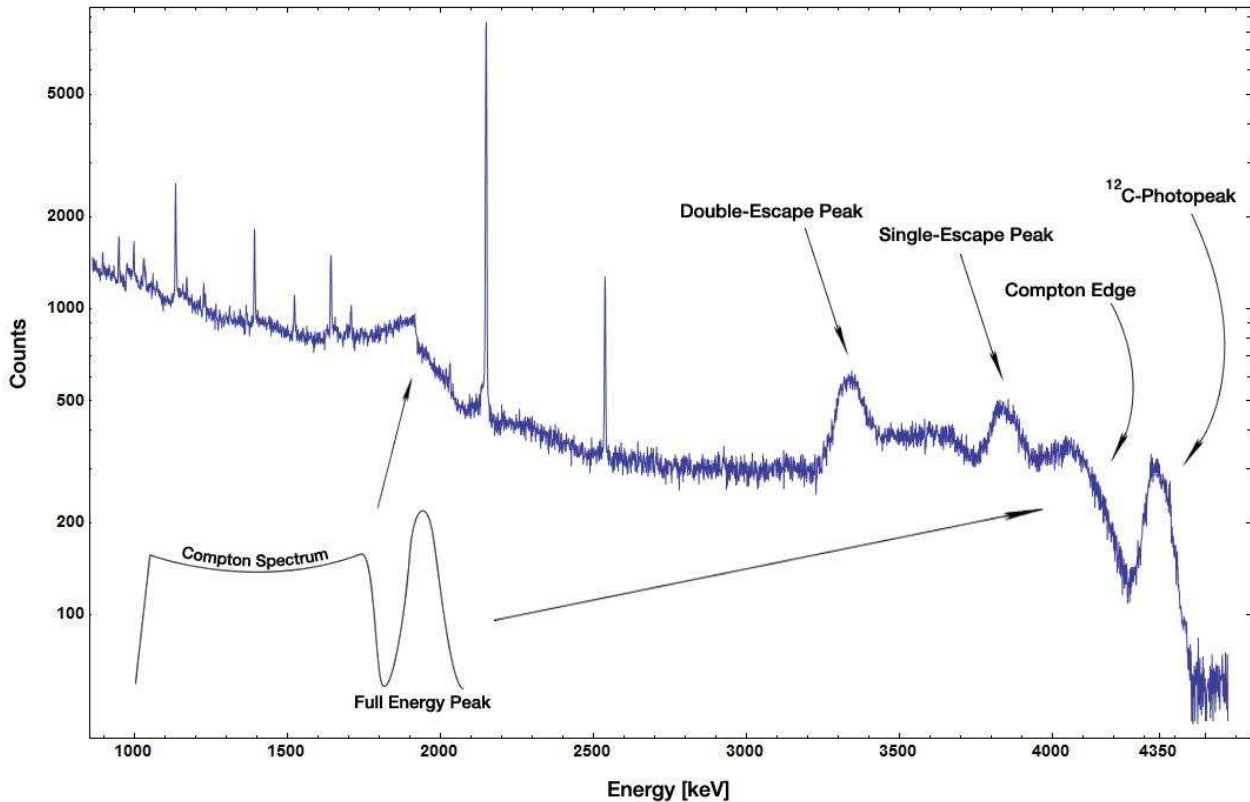


Abbildung 1: Gamma-Spektrum (Quelle [2])

1.3.2 Halbleiter-Detektoren

Zur Herstellung eines HPGe-Detektors wird ein hochreiner Germanium Kristall gezogen und bestimmte Bereiche mit Fremdatomen dotiert. Dabei entstehen sowohl p-, als auch n-dotierte Bereiche, die entweder einen Mangel an Elektronen (Loch) haben, bzw. einen Elektronenüberschuss. An der Grenzfläche zwischen diesen beiden Zonen gibt es keine freie Ladungsdichteverteilung. Sobald energiereiche Strahlung auf diese Zone trifft, werden Elektron-Loch-Paare erzeugt, die von den Elektroden angezogen werden und somit einen messbaren Spannungsabfall erzeugen, der proportional zur Strahlungsenergie ist. Die Energie zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares in Germanium beträgt 2,95 eV, während die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband bei ca. 1 eV liegt, was u.a. daran liegt, dass ein Teil der Energie in Gitterschwingungen (Phononen) übergeht.

Für den Detektor wird Reinstgermanium verwendet mit 99,99 % Germaniumatomen, also mit einem Fremdatom auf 10^{10} Germaniumatome. Der Detektor darf nicht mehr als 10^{16} Verunreinigungen pro m^3 haben, sonst wird die Leitfähigkeit zu hoch. Für diesen Versuch wird ein

Detektor mit einer relativen Nachweiswahrscheinlichkeit von 30 % gegenüber eines bestimmten zylindrischen Szintillationsdetektors aus NaI benutzt. Da dieser Wert nur relativ ist, kann es durchaus auch eine höhere Nachweiswahrscheinlichkeit als 100 % geben, was jedoch aus finanziellen Gründen nicht praktiziert wird, da jedes % Nachweiswahrscheinlichkeit ca. 800 € kostet.

2 Versuchsaufbau und -Durchführung

Als Messinstrument dient ein Germanium-Halbleiterdetektor, sowie eine Reihe elektronischer Hilfsmittel zur Datenverarbeitung. Der Detektor erzeugt bei einem gemessenen Ereignis einen Spannungsabfall. Der am Detektor registrierte Spannungsabfall wird mit Hilfe eines Vorverstärkers verstärkt und zum Hauptverstärker weiter geleitet. Dieser invertiert das Signal und formt es zu einem gaußförmigen Signal, da der Analog-Digital-Wandler das Signal sonst nicht verarbeiten kann. Vom Analog-Digital-Wandler, wird ein logisches Signal zu einem Vielkanalanalysator und schließlich zu einem Rechner weitergegeben. Die folgende Grafik zeigt schematisch die Formen der Ausgangssignale des jeweiligen Elements.

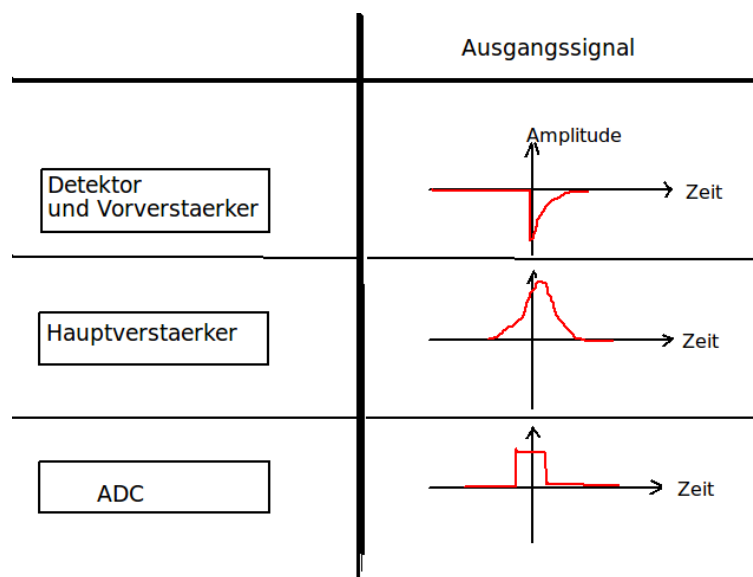


Abbildung 2: Ausgangssignale der Messelektronik

In unmittelbarer Nähe zum Detektor befindet sich die Probe, sodass möglichst viele Gammaquanten den Detektor passieren.

Zunächst werden die γ -Spektren von ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{60}Co und der Hintergrundstrahlung aufgenommen. Mit Hilfe dieser Spektren wird eine Energiekalibrierung durchgeführt und anschließend die Nachweiswahrscheinlichkeiten und Aktivitäten bestimmt. Zuletzt wird das γ -Spektrum von türkischem Tee aus dem Jahre 1986 aufgenommen.

Die folgende Tabelle zeigt die Messzeiten der jeweiligen Messung ohne die Totzeiten des Detektors.

Tabelle 1: Die Messzeiten der einzelnen Messungen

Nr.	Messung	Messzeit (s)
1	Am-241	210,9
2	Ba-133	1507,34
3	Cs-137	1954,81
4	Co-60	822,36
5	Hintergrund	3447,067
6	türk. Tee	2311,8

3 Auswertung

3.1 Energiekalibrierung

Da die Messsoftware lediglich Signale von einem Vielkanalanalysator empfängt, muss zuerst eine Energiekalibrierung vorgenommen werden. Da die γ -Energien bestimmter Zerfälle bekannt sind, werden die Energiespektren verschiedener Kalibrierproben gemessen und die Software auf die signifikanten Peaks kalibriert. Die signifikantesten Peaks besitzen zunächst nur einen Kanalwert. Die Zuordnung $K \rightarrow E$ wird durch eine Kalibriergerade $E = (a \cdot Kanal + b)$ eindeutig bestimmt.

Für die Kalibrierung wurde wie folgt zugeordnet:

Tabelle 2: Zuordnung der Energiekalibrierung

Nuklid	Kanal	Energie (keV)	Unsicherheit (keV)
Am-241	210,9	59,54	1
Ba-133	242,7	81	1
Cs-137	1102,9	661,7	1
Co-60	1864,8	1173	1

Die Parameter a und b werden bestimmt, indem durch die o.g. Punkte in einem Energie/Kanal-Koordinatensystem eine Ausgleichsrechnung durchgeführt wird. Dies wurde im Versuch mit der Software direkt durchgeführt.

Die mit der Software durchgeführte Ausgleichsrechnung ergab die Parameter:

$$a = (0,674 \pm 0,645) \text{ keV/Kanal}$$

$$b = (-8,23 \pm 0,001) \text{ keV}$$

3.2 Energieauflösung

Ein Maß für die Energieauflösung des HPGe-Detektors sind die Halbwertsbreiten der charakteristischen γ -Peaks. Im Folgenden soll untersucht werden wie sich die Halbwertsbreiten bei

unterschiedlichen γ -Energien verhalten. Die Folgende Grafik zeigt die ermittelten Halbwertsbreiten über die Zentroidenergien der Peaks aufgetragen. Zunächst konnte kein Zusammenhang zwischen der Energieauflösung und der Energie festgestellt werden. Allerdings wiesen die gemessenen Peaks allesamt auf eine störungsbehaftete Messung hin, da deren Form untypisch für eine Impulsverteilung ist. Die Ursache ist möglicherweise ein defekter Detektor.

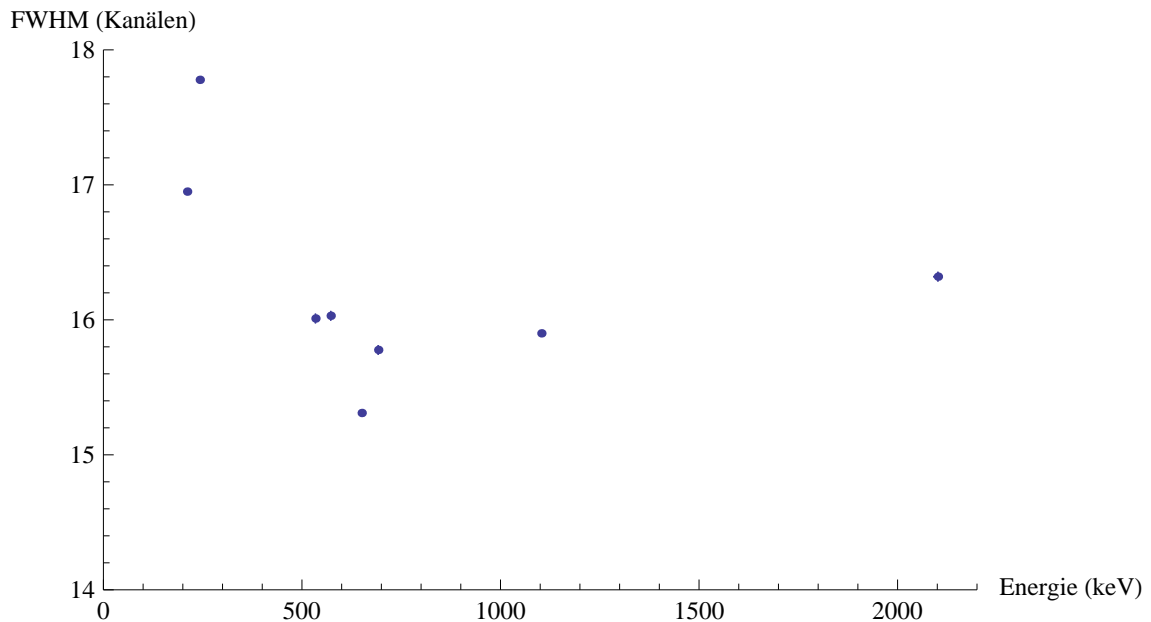


Abbildung 3: Halbwertsbreiten gegenüber der Zentroidenergien charakteristischer Gamma-Peaks. Die Unsicherheiten sind so klein, dass sie nicht sichtbar sind.

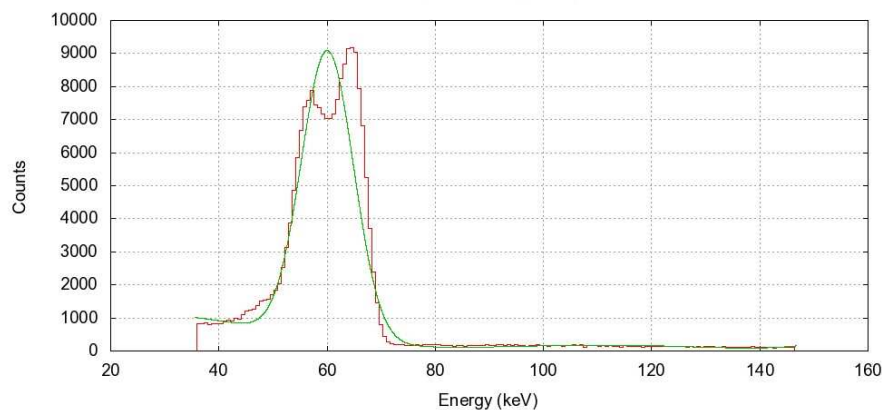


Abbildung 4: Gamma-Peak mit Fit des gemessenen Am-241-Spektrums. Die untypische Verteilung der Impulse weist auf eine störungsbehaftete Messung hin.

3.3 Hintergrundstrahlung

Es wurde die Hintergrundstrahlung über eine Zeit von $t = 3347,07$ s gemessen, um das Vorkommen natürlicher radioaktiver Nuklide und deren Zerfallsprodukte zu messen. Die Abbildung

[9] im Anhang zeigt das gesamte gemessene Spektrum. Da der Detektor vermutlich defekt war, werden für die Nuklidsuche lediglich 5 Peaks zwischen 470 keV und 1500 keV untersucht.

Tabelle 3: gemessene natürlich vorkommende radioaktive Nuklide

Nr.	Energie (keV)	Isotop	aus Zerfallsreihe von
1	$511,59 \pm 1$	/	Kein natürlicher Kernzerfall
2	$583,19 \pm 1$	^{208}Tl	^{232}Th
3	$609,8 \pm 1$	^{214}Bi	^{238}U
4	$911,7 \pm 1$	^{228}Ac	^{232}Th
5	$1464,1 \pm 1$	^{40}K	

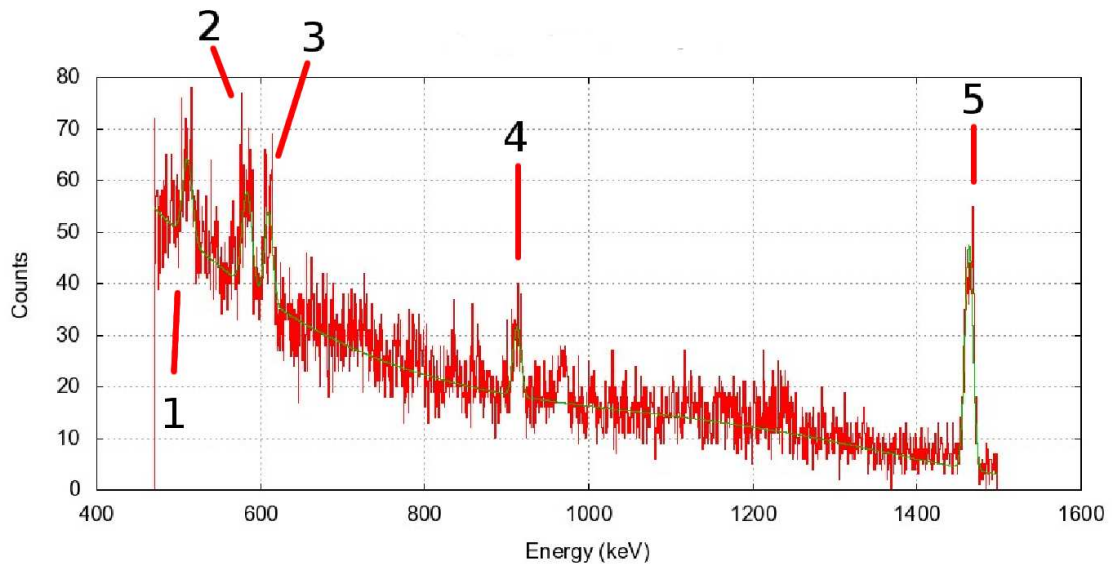


Abbildung 5: Ausschnitt des gemessenen Hintergrundspektrums

3.4 Nachweiswahrscheinlichkeit

Die Nachweiswahrscheinlichkeit des HP-Ge Detektors ϵ ergibt sich aus dem Verhältnis der Zählrate des Detektors r_D und der Emissionswahrscheinlichkeit p mal der Aktivität A , also $\epsilon = \frac{r_D}{p \cdot A}$. Dabei setzt sich ϵ selbst aus dem Produkt eines intrinsischen ϵ_{int} und eines geometrischen Anteils ϵ_{geo} zusammen ($\epsilon = \epsilon_{\text{int}} \cdot \epsilon_{\text{geo}}$), auf die jedoch nicht näher eingegangen wird. Die Zählrate $r_D = \frac{N_n}{t}$ ist die gemessene Anzahl der Netto-Ereignisse N_n , also abzüglich der Hintergrundereignisse, geteilt durch die reale Messzeit ohne die Totzeit t . Damit folgt schließlich für die Nachweiswahrscheinlichkeit:

$$\epsilon = \frac{r_D}{p \cdot A} = \frac{N_n}{t \cdot p \cdot A} \quad (1)$$

Die Unsicherheit ist:

$$\Delta\epsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_n}{t \cdot p \cdot A}\right)^2 + \left(\frac{N_n \cdot \Delta A}{t \cdot p \cdot A^2}\right)^2} \quad (2)$$

Anhand der nachstehenden Tabelle, in der u.a. auch die mit Hilfe der Gaußschen Varianzenfortpflanzung berechneten Unsicherheiten angegeben sind, wurde die folgende Funktion ausgeglichen:

$$\epsilon(E) = a \cdot (E/\text{keV})^b = (3,05 \pm 1,96) \cdot (E/\text{keV})^{(-0,96 \pm 0,11)} \quad (3)$$

Die ersten zwei Punkte aus der Tabelle wurden für die Ausgleichsgerade vernachlässigt, da die Funktion erst im höherenergetischen Bereich einen linearen Verlauf auf einem doppelt-logarithmischen Diagramm annimmt und die ersten zwei Werte zu einem nichtlinearen Verlauf gehören. Mit dieser Funktion errechnet sich für eine Energie von 850 keV eine Nachweiswahrscheinlichkeit von 0,47 %. Der χ^2 -Test liefert das Ergebnis $7,18 \cdot 10^{-7}$ und ist somit bestanden.

Tabelle 4: Tabelle für den Funktionsfit der Nachweiswahrscheinlichkeit (Quelle [6])

	Energy (keV)	u(Energy) (keV)	N_n	u(N_n)	u_rel(N_n) (%)	p	t (s)	T1/2 (a)	A0 (kBq)	Zerfallszeit (a)	A (Bq)	ϵ	u(ϵ)	
Am	59,54		1	156425,95	448,31	0,29	0,36	615,59	432,17	40	12,07	39232,85	0,01799	0,00054
Ba1	81		1	336661,21	773,09	0,23	0,34	1507,34	10,54	44,9	12,10	20259,33	0,03232	0,00097
Ba2	276,4		1	26430,90	269,47	1,02	0,07	1507,34	10,54	44,9	12,09	20262,98	0,01210	0,00038
Ba3	302,85		1	73921,19	332,81	0,45	0,18	1507,34	10,54	44,9	12,09	20266,63	0,01322	0,00040
Ba4	356,02		1	209684,50	476,92	0,23	0,62	1507,34	10,54	44,9	12,09	20270,28	0,01108	0,00033
Ba5	383,85		1	28341,62	192,34	0,68	0,09	1507,34	10,54	44,9	12,08	20273,93	0,01041	0,00032
Cs	661,7		1	309919,85	567,17	0,18	0,85	1954,81	30,12	45,7	12,08	34605,76	0,00538	0,00016
Co1	1173		1	24358,07	185,57	0,76	1,00	822,36	5,27	46,1	12,08	9415,93	0,00315	0,00010
Co2	1333		1	20731,80	149,88	0,72	1,00	822,36	5,27	46,1	12,08	9419,32	0,00268	0,00008

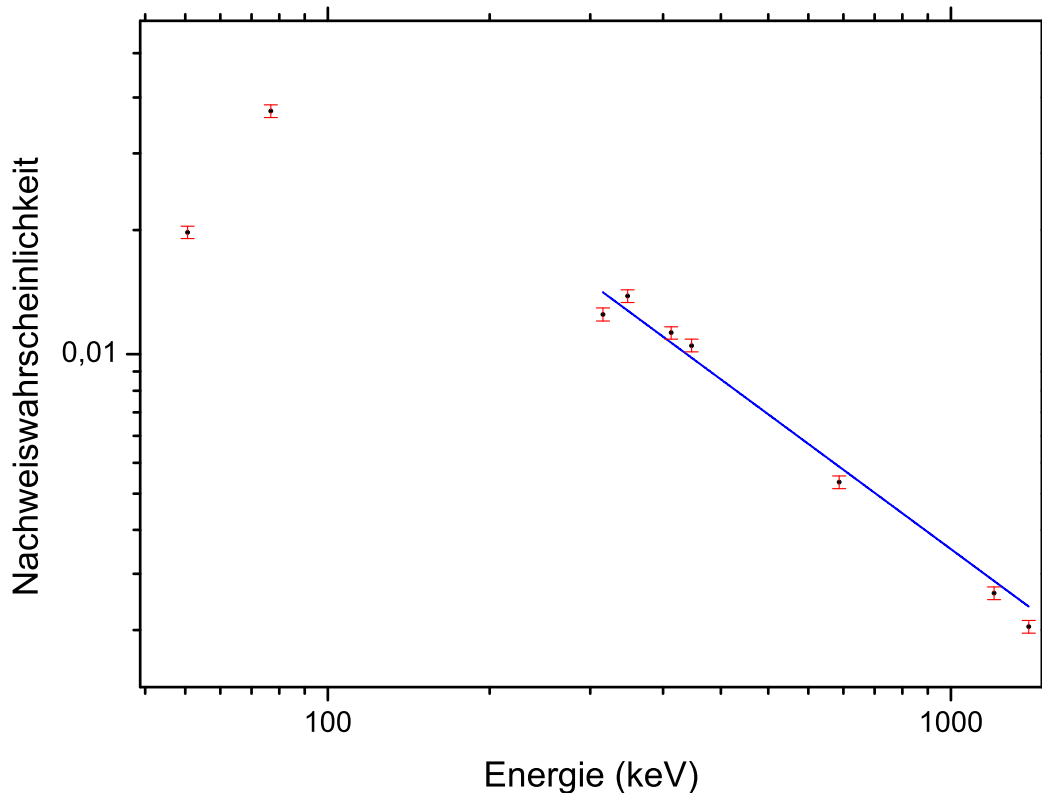


Abbildung 6: Funktionsausgleich der Nachweiswahrscheinlichkeit

3.5 türkischer Tee

Die folgende Grafik zeigt das gemessene Spektrum des türkischen Tees:

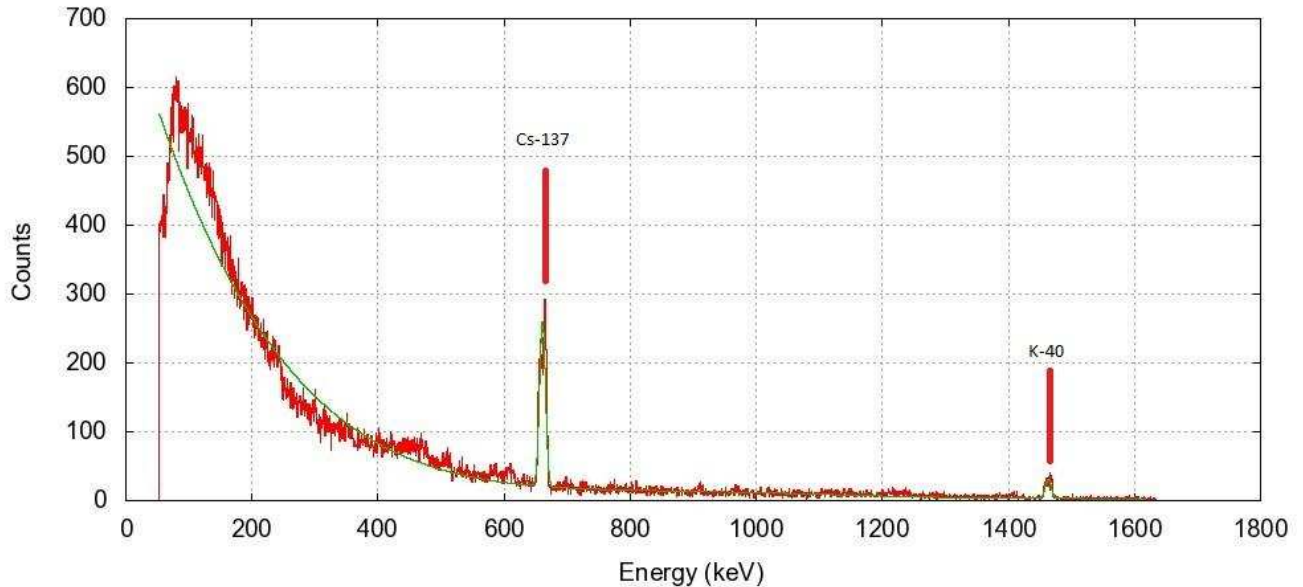


Abbildung 7: Spektrum des türkischen Tees aus dem Jahre 1986

Der Peak bei 661,7 keV zeigt deutlich, dass der Tee mit ^{137}Cs kontaminiert ist. Bei einer Nachweiswahrscheinlichkeit von $(0,538 \pm 0,01) \%$ beträgt die Aktivität:

$$A = \frac{\text{Peakcounts}}{\text{Nachweiswkt} \cdot \text{Messzeit}} = (314,083 \pm 5,99) \text{ Bq} \quad (4)$$

Die Unsicherheit wird über eine Gaußsche Varianzenfortpflanzung berechnet:

$$u(A) = \sqrt{\left(\frac{d}{d\text{Counts}} A \cdot u(\text{Counts})\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} A \cdot u(p)\right)^2} \quad (5)$$

Mit $u(p) = 0,0001 \%$ als Unsicherheit für die Nachweiswahrscheinlichkeit, und $u(\text{Counts}) = 17,025$ als Unsicherheit für die Impulse. $u(\text{Counts})$ wurde berechnet, indem aus der Standardabweichung σ die Halbwertsbreite des ^{137}Cs -Peaks berechnet wurde.

$$FWHM = 2 \cdot \sqrt{2 \ln 2} \cdot \sigma \quad (6)$$

Nach Quelle [7] wird die Äquivalentdosisleistung \dot{H} einer punktförmigen Quelle wie folgt berechnet:

$$\dot{H} = \Gamma \frac{A}{r^2} \text{ mit } \Gamma = (8,46 \pm 0,03) \cdot 10^{-14} \frac{\text{Sv m}^2}{\text{Bq h}} \quad (7)$$

Dabei ist r der Abstand zur Quelle, A die Aktivität und Γ die γ -Dosiskonstante. Wird die Teeprobe als nahezu punktförmig angenommen, wird im Abstand $r = 1 \text{ cm}$ eine Äquivalentdosisleistung

von $\dot{H} = (2,66 \pm 0,05) \cdot 10^{-7} \text{ Bq h}^{-1}$ berechnet.

Die Fragestellung lautete, welche Dosis ein Mensch bei einer einmaligen Aufnahme des Tees in 50 Jahren erwartet. Für einen Menschen mit der Körpermasse von 75 kg bedeutet dies bei einer Zeit von ca. 50 Jahren eine Effektivdosis von

$$D_{eff} = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mSv}}{\text{Bq}} \cdot A_0 = (4,08 \pm 0,06) \cdot 10^{-6} \text{ Sv} \quad (8)$$

Die Berechnung für die effektive 50-Jahre-Äquivalentfolgedosis wurde mithilfe der Dosiskoeffizienten des Bundesamtes für Strahlenschutz durchgeführt (Quelle [8]).

3.6 Diskussion

Der Versuch hat gezeigt, dass sich im Tee ein messbarer Anteil des radioaktiven Cäsiumisotops ^{137}Cs befindet. Es hat sich herausgestellt, dass die effektive Dosis bei der einmaligen Aufnahme der im Tee enthaltenen Radioaktivität sogar über einen Zeitraum von 50 Jahren in der Größenordnung von 10^{-6} Sv liegt. Da es sich bei der Aktivität um einen exponentiellen Abfall handelt, nimmt der Tee-Trinker den Großteil der Dosis bereits in den ersten Jahren nach dem Konsum des Tees auf. Das bedeutet, dass der einmalige Konsum dieses Tees eine Erhöhung der natürlichen Jahresdosis um ca. 1/100000 bewirkt, wobei angenommen wird, dass ein Mitteleuropäer einer Strahlendosis von durchschnittlich 2 mSv/Jahr ausgesetzt ist (Quelle [7]). Das Fazit ist, dass die einmalige Aufnahme des Tees relativ ungefährlich ist, während der regelmäßige Konsum mit der Zeit durchaus zu einer nennenswerten zusätzlichen Dosis führen kann.

3.7 Literatur

[1] Decay data search, WWW-Adresse:

<http://nucleardata.nuclear.lu.se/database/nudat>
06.01.2012

[2] Wikipedia, WWW-Adresse:

<http://wikipedia.org>
06.01.2012

[3] Vorlesungssammlung Physik, Universität Ulm, WWW-Adresse:

http://vorsam.uni-ulm.de/Versuche/G/PDF/G_010F00.PDF
06.01.2012

[4] Versuchsanleitung zum Versuch 2.2b, Version vom 06.02.2008, TU Darmstadt

[5] Werner Stolz, Radioaktivität: Grundlagen - Messung - Anwendungen, Vieweg+Teubner Verlag (2005)

[6] Excel-Tabelle zur Versuchsauswertung von J.Birkhan, Version vom 20.12.2011, TU Darmstadt

[7] Claus Grupen, Grundkurs Strahlenschutz, Springer Verlag (2008)

[8] Bundesamt für Strahlenschutz, Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition,
28.08.2001:

<http://www.bfs.de/de/bfs/recht/dosis.html>

26.01.2012

A Anhang

A.1 Zerfallsschema von ^{40}K

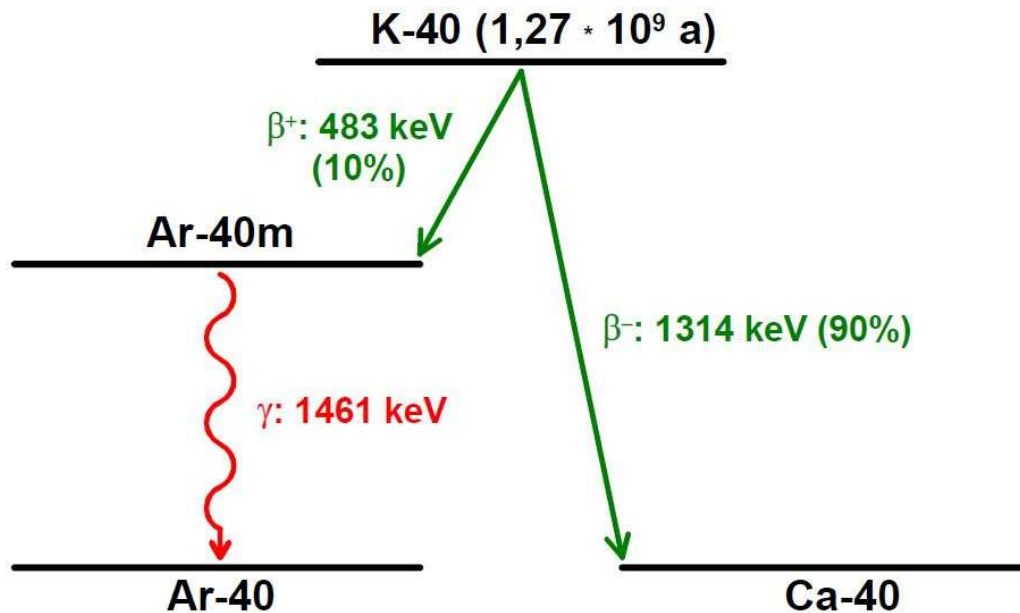


Abbildung 8: Zerfallsschema von ^{40}K (Quelle [3])

A.2 Zerfall von ^{238}U

Tabelle 5: Zerfallslinien von ^{238}U (Quelle [1])

Isotop	Gamma-Energie (keV)
^{238}U	49,55; 113,5
^{234}Th	63,29; 92,38; 92,8
^{234}Pa	131,3; 152,72; 227,25; 569,5; 733,39; 883,24; 925; 926,72; 946
^{234}U	53,2; 120,9
^{230}Th	67,67; 143,87; 253,73
^{226}Ra	186,21; 262,27; 600,66
^{222}Rn	511
^{218}Po	/
^{214}Pb	241,99; 295,22; 351,93
^{214}Bi	609,31; 1120,29; 1238,11; 1764,49; 2204,21
^{214}Po	298; 799,7
^{210}Pb	46,54
^{210}Bi	265,83; 304,9
^{210}Po	803,1
oder ^{206}Tl	362; 803,1; 1166
^{206}Pb	stabil

A.3 Zerfall von ^{235}U

Tabelle 6: Zerfallslinien von ^{235}U (Quelle [1])

Isotop	Gamma-Energie (keV)
^{235}U	143,76; 163,36; 185,71; 205,31
^{231}Th	25,65; 84,22
^{231}Pa	27,36; 283,69; 300,07; 302,65; 330,06
^{227}Ac	69,21; 100; 160,26
^{227}Th	50,13; 235,97; 256,25
^{223}Ra	122,32; 144,23; 154,21; 323,87; 338,28; 445,03
^{219}Rn	271,23; 401,81
^{215}Po	438,8
^{211}Pb	404,85; 427,09; 832,01
^{211}Bi	351,06
^{207}Tl	328,12; 569,7; 897,8
^{207}Pb	stabil

A.4 Zerfall von ^{232}Th

Tabelle 7: Zerfallslinien von ^{232}Th (Quelle [1])

Isotop	Gamma-Energie (keV)
^{232}Th	63,83; 140,86
^{228}Ra	12,75; 13,52; 16,2
^{228}Ac	338,32; 463; 794,95; 911,2; 964,77; 968,97
^{228}Th	84,37; 131,61; 215,98
^{224}Ra	240,99; 292,7; 645,5
^{220}Rn	549,76;
^{216}Po	804,9
^{212}Pb	115,18; 238,63; 300,09
^{212}Bi	39,86; 727,33; 785,37; 1620,5
^{208}Tl oder ^{212}Po	277,35; 510,77; 583,19; 860,56; 2614,53 /
^{207}Pb	stabil

A.5 Hintergrund

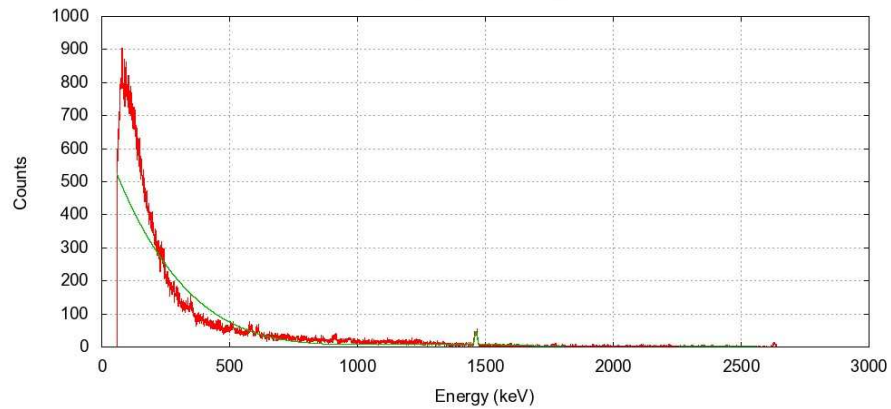


Abbildung 9: gesamtes Hintergrundspektrum

A.6 Aktivitäten am Praktikumstag

Tabelle 8: Aktivitäten der am Praktikumstag verwendeten Quellen

Quelle	Isotop	Aktivität A_0 (kBq)	Referenzdatum	E_γ (keV)	br (%)	$A(t) \times br$ (kBq)
GW 380	^{137}Cs	$34,61 \pm 1,04$	20.12.2011	661.7	85,1	29,453
GW 382	^{60}Co	$9,45 \pm 0,28$	20.12.2011	1173.2	99,97	9,447
GW 382	^{60}Co	$9,45 \pm 0,28$	20.12.2011	1332.5	99,99	9,449
GW 379	^{133}Ba	$20,28 \pm 0,61$	20.12.2011	81.0	34,06	6,907
GW 379	^{133}Ba	$20,28 \pm 0,61$	20.12.2011	276.4	7,16	1,452
GW 379	^{133}Ba	$20,28 \pm 0,61$	20.12.2011	302.9	18,33	3,717
GW 379	^{133}Ba	$20,28 \pm 0,61$	20.12.2011	356.0	62,05	12,584
GW379	^{133}Ba	$20,28 \pm 0,61$	20.12.2011	383.8	8,94	1,813
NX 434	^{210}Pb	$33,99 \pm 1,36$	20.12.2011	46.5	4,25	1,445
NA 568	^{57}Co	$0,65 \pm 0,02$	20.12.2011	122.1	85,6	0,556
		$0,65 \pm 0,02$	20.12.2011	136.5	10,86	0,069

A.7 Germanium-Detektor

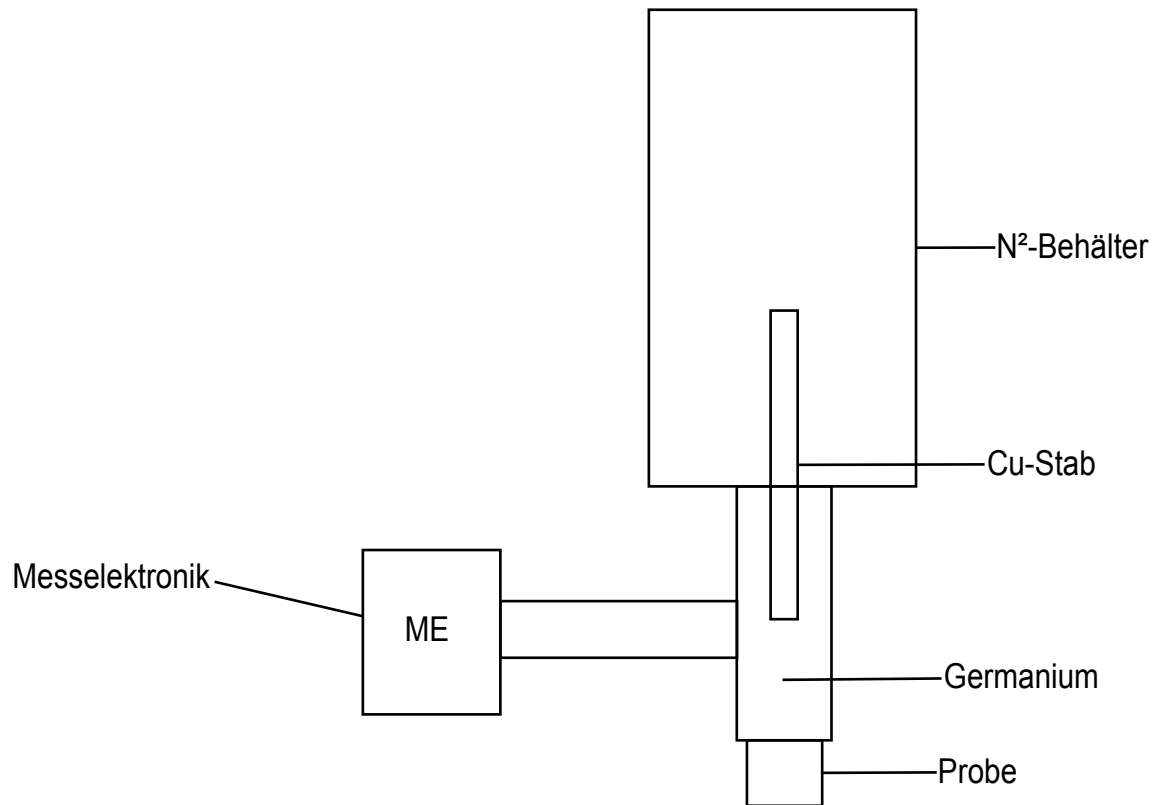


Abbildung 10: Aufbau des Germanium-Detektors