

# Versuch 2.2b: Radioaktivität in der Umwelt

Praktikanten: Carl Böhmer, Maxim Singer  
Betreuerin: Gabriele Hoffmeister

Durchführung: 01.11.2010

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ziel</b>	<b>2</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Wechselwirkungen von $\gamma$ -Quanten mit Materie . . . . .	2
2.2 Halbleiter und Halbleiterdetektoren . . . . .	3
2.3 Radioaktivität einer Flasche Mineralwasser . . . . .	4
<b>3 Durchführung</b>	<b>4</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>5</b>
4.1 Untergrund . . . . .	5
4.2 Nachweiswahrscheinlichkeit . . . . .	5
4.3 Materialanalyse . . . . .	6
4.4 Energieauflösung . . . . .	7
4.5 Alltagsgegenstand . . . . .	7
<b>5 Quellen</b>	<b>8</b>
<b>6 Eigenständigkeitserklärung</b>	<b>9</b>
<b>A Anhang</b>	<b>10</b>

## 1 Ziel

Dieser Versuch hat das Ziel das natürliche Hintergrundspektrum und einen Gegenstand des alltäglichen Lebens mit  $\gamma$ -Spektroskopie zu analysieren. Zusätzlich wird versucht das Röntgenspektrum einer unbekanntes Materialprobe zu analysieren und so auf das chemische Element, aus dem diese Probe besteht, zu schließen. Vermessen wird das Spektrum mit einem hochreinen Germanium-Detektor, der eine Energieauflösung von wenigen keV erlaubt. Dies ermöglicht uns die auftretenden Energiepeaks den diskreten Energien verschiedener Isotope zuzuordnen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Wechselwirkungen von $\gamma$ -Quanten mit Materie

Man beobachtet drei verschiedene Wechselwirkungen wenn  $\gamma$ -Strahlung auf Materie trifft. Zunächst wäre der **Photoeffekt** zu nennen. Er besteht darin, dass das Photon von einem Atom absorbiert und dadurch ein Elektron ausgeschlagen

wird. Die kinetische Energie des Elektrons entspricht der Energie des Photons abzüglich der Bindungsenergie des Elektrons im Atom. Im Energiebereich bis 100 keV tritt vornehmlich diese Wechselwirkung auf. Bei höheren  $\gamma$ -Energien von einigen MeV dominiert der **Compton-Effekt**, bei dem das Photon an einem quasifreien Elektron gestreut wird. Dabei gibt dieses einen Teil seiner Energie an das Elektron ab. Ab einer Energie von 1022 keV des Gammas ist zudem **Paarbildung** möglich. Im elektromagnetischen Feld des Kerns bildet das  $\gamma$ -Quant ein Elektron-Positron-Paar. Das Positron zerstrahlt kurz darauf mit einem Elektron zu zwei Photonen, die im Winkel von  $180^\circ$  zueinander emittiert werden und jeweils die Energie 511 keV aufweisen, die Ruhemasse des Elektrons bzw. Positrons. Dominierend wird der Effekt ab einer Energie von 5 MeV.

## 2.2 Halbleiter und Halbleiterdetektoren

Zur  $\gamma$ -Spektroskopie in diesem Versuch wird ein Germaniumkristall verwendet, genauer in Form einer Diode. Ein Halbleiter wird dadurch charakterisiert, dass sich zwischen Valenz- und Leitungsband nur eine relativ kleine Bandlücke (1 eV) befindet. Innerhalb dieser liegt auch die Fermi-Energie des Halbleiters. Nur wenige Elektronen werden durch thermische Energie in das Leitungsband angehoben. Werden Elektronen in das Leitungsband gehoben und somit zu über den Kristall frei beweglichen Elektronen, so hinterlassen sie Löcher an ihrer ursprünglichen Position. Diese Löcher können von einem benachbarten Elektron im Valenzband aufgefüllt werden. Dadurch wandert das Loch über den Kristall, und durch seine gegenüber den es umgebende „Meer“ aus negativen Elektronen stellt es einen positiven Ladungsträger dar. Halbleiter verfügen also über zwei Sorten Ladungsträger: positive Löcher im Valenzband und negative Elektronen im Leitungsband.

Unter dem Dotieren eines Halbleiter versteht man das Einbringen von Fremdatomen mit einer bestimmten Zahl an Valenzelektronen. Weisen die Fremdatome mehr Valenzelektronen als der eigentliche Halbleiter (im Falle von Germanium vier) auf, spricht man von einer **n-Dotierung** und der Halbleiter hat so zusätzliche Elektronen als bewegliche Ladungsträger. Weisen die Fremdatome weniger Valenzelektronen auf, handelt es sich um ein **p-dotierten** Halbleiter, der über zusätzliche Löcher besitzt. Im n-dotierten Halbleiter wird die Fermi-Energie angehoben, in p-dotierten abgesenkt.

Wird nun ein Übergang von einem p- zu einem n-dotierten Halbleiter geschaffen, so diffundieren Elektronen aus der n-Region in die p-Region und Löcher aus der p- in die n-Gegend. Dadurch ist der p-dotierte Halbleiter in der Kontaktregion negativ geladen und der n-dotierte in Kontaktnähe positiv. Das gebildete elektrische Feld in dieser von beweglichen Ladungsträger-freien Zone sorgt dafür, dass durch beispielsweise ionisierende Strahlung gebildete Elektronen-Loch-Paare aus der Zone heraus transportiert werden und so detektiert werden können. Durch

eine zusätzliches in Sperrichtung angelegtes äußeres Hochspannung wird diese Zone noch vergrößert und die entstehenden Ladungsträger werden besser abtransportiert. Die detektierten Ladungsträger lassen einen direkten Rückschluss auf die Energie der ionisierenden Strahlung zu. Werden zwei  $\gamma$ -Quanten gleichzeitig im Detektor detektiert, so kann der Detektor diese beiden nicht unterscheiden sondern hält sie für ein einziges Quant, mit der Summe der von diesen  $\gamma$ -Quanten im Kristall deponierten Energie als Energie.

Obwohl die Bandlücke nur etwa 1 eV beträgt, benötigt man in Germanium im Mittel 2,96 eV zur Bildung eines Elektron-Loch-Paares. Die Differenz wird zur Erregung von Phononen benutzt. Von  $\gamma$ -Quanten durch eine Wechselwirkung produzierte Elektronen (oder auch Positronen) geben durch Stöße ihre kinetische Energie ab, wobei weitere Elektronen-Loch-Paare entstehen, sodass die Zahl der getrennten Ladungsträger proportional zur deponierten Energie der  $\gamma$ -Strahlung ist.

## 2.3 Radioaktivität einer Flasche Mineralwasser

Zur Vorbereitung sollte die Aktivität einer Flasche Mineralwasser berechnet werden.

Gegebene Größen: Volumen 0.7l, Kaliumkonzentration 18.7mg/l, Isotopenhäufigkeit von  $^{40}\text{K}$  0.0117%, Molmasse 40g,  $N_A$  ist die Avogadrokonstante.

$$A = \lambda \cdot N = \frac{\ln(2)}{(1.25 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60) \text{s}} \cdot \frac{0.7 \text{l} \cdot 0.0187 \text{g/l}}{40 \text{g/Mol}} \cdot N_A \cdot 0.000117 = 0.397 \text{Bq}$$

## 3 Durchführung

Nach dem die Messapparatur laut dem Aufgabenblatt in Betrieb genommen wurde, haben wir eine Energiekalibrierung durchgeführt. Dazu wurden  $\gamma$ -Linie von  $^{241}\text{Am}$  (E=59.54keV),  $^{137}\text{Cs}$  (E=661.7keV) und  $^{60}\text{Co}$  (E=1173.2keV, E=1332.5keV) verwendet. Um möglichst genaue Kanal-Energie-Zuordnung zu bekommen, haben wir eine Polynomfunktion dritten Graden genommen. Diese Funktion rechnet Kanalnummern direkt in die entsprechenden Energien in keV um.

$$E(C) = 1.165 \cdot 10^{-10} \cdot C^3 - 2.070 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + 0.40314 \cdot C - 3.476$$

Somit ist die Energiekalibrierung im gesamten Spektrum auf 0.40(1)keV genau.

Nach der Kalibrierung, haben wir die Untersuchung einer Materialprobe und Messung des Spektrums eines Alltagsgegenstands durchgeführt. Anschließend wurde das Untergrundspektrum vermessen.

## 4 Auswertung

### 4.1 Untergrund

Der natürliche Strahlungshintergrund wurde 3973s lang gemessen. In dem  $\gamma$ -Spektrum[1] treten eindeutige Peaks auf, die von Isotopen natürlicher Zerfallsreihen stammen[5]. Um die Energien den Isotopen zuzuordnen haben wir bereits im Vorfeld erstellte Tabellen [7][8][9] verwendet.

Im Untergrund tritt auch eine markante 1460keV-Linie auf, die von  $^{40}K$  kommt [9].

Für die Auswertung anderer Messungen wurde das Untergrundspektrum skaliert und von den anderen Spektren subtrahiert.

### 4.2 Nachweiswahrscheinlichkeit

Zur Bestimmung der Photopeaknachweiswahrscheinlichkeit des Detektors ist zunächst wichtig wie viele  $\gamma$ -Quanten von der jeweiligen Quelle während der Messzeit emittiert werden. Die Anzahl der Quanten ist gegeben durch

$$N_{em} = -b \int_{t_{anfang}}^{t_{ende}} A_0 e^{-\lambda t} dt$$

Dabei ist  $b$  das Verzweigungsverhältnis,  $A_0$  die Aktivität zu einem Referenzzeitpunkt, auf den sich  $t_{ende}$  und  $t_{anfang}$  beziehen. In dem die Aktivität am Versuchstag bestimmt wurde und  $t_{anfang} = 0$  gesetzt wird ergibt sich

$$N_{em} = -b \int_0^{t_{live}} A_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{bA_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{live}})$$

$t_{live}$  ist die Zeit in der der Detektor in der Lage war ein Quant zu detektieren, d.h. die reale Zeit ohne Totzeit. Da die Messzeit im Vergleich zur Halbwertszeit sehr klein ist, lässt sich der Ausdruck in einer Taylorreihe um 0 entwickeln und  $N_{em}$  sich durch den ersten nicht verschwindenden Term annähern.

$$N_{em} \approx bA_0 t_{live}$$

Durch die Einbeziehung des Raumwinkels  $\Omega = \frac{\pi R^2}{r^2}$ , den der Detektor einnimmt, ergibt sich für die Zahl der während der Messung in den Detektor eintretenden Quanten  $N$

$$N \approx bA_0 t_{live} \frac{\Omega}{4\pi} = bA_0 t_{live} \frac{R^2}{4r^2}$$

$R$  ist in der Versuchsanleitung als der Radius des Detektors mit  $\frac{57mm}{2}$  gegeben,  $r$  wurde als  $60mm \pm 1mm$  bestimmt. Die Nachweiswahrscheinlichkeit wird dann

errechnet zu  $\epsilon = \frac{N_{gem}}{N}$ . Zur Fehlerabschätzung wird bei den gemessenen Ereignissen  $\Delta N_{gem} = \sqrt{N_{gem}}$  angenommen.  $N_{gem}$  wurde durch Integrieren über den Peak bestimmt. Als schwer einzuschätzende Unsicherheit ist hier ein gewisser Rahmen zu nennen, in dem man die Integrationsgrenzen wählen konnte. Dennoch beschränken wir uns auf  $\sqrt{N_{gem}}$ . Die Fehler von Nachweiswahrscheinlichkeit und N ergeben sich nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung.

$$\Delta\epsilon = \epsilon \sqrt{\left(\frac{\Delta N_{gem}}{N_{gem}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2}$$

$$\Delta N = N \sqrt{\left(\frac{\Delta A_0}{A_0}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta r}{r}\right)^2}$$

Die Werte wurden mit der Funktion  $\epsilon(E) = a \cdot \left(\frac{E}{keV}\right)^b$  gefittet[7]. Mit ermittelten Parametern ergab sich daraus

$$\epsilon(E) = (1.76847 \pm 0.4485) \cdot \left(\frac{E}{keV}\right)^{-0.427127 \pm 0.05269}$$

Für E=850 keV beträgt die Nachweiswahrscheinlichkeit nach diesem Fit 9.9%.

Isotop	$\gamma$ -Energie (keV)	$t_{live}$	$N_{gem}$	N	$\epsilon$
<sup>241</sup> Am	59.5	49.560s	12651.54	41094±1849	0.307±0.014
<sup>137</sup> Cs	661.7	174.055s	39772.23	296497±13342	0.134±0.006
<sup>60</sup> Co	1173.2	352.580s	16889.55	218764±9844	0.077±0.004
<sup>60</sup> Co	1332.5	352.580s	14760.64	218765±9844	0.067±0.003

Tabelle 1: Nachweiswahrscheinlichkeiten

### 4.3 Materialanalyse

Für die Materialanalyse haben wir das Plättchen Nr. 5 verwendet. Die Messzeit betrug 1841s. Das vom Untergrund bereinigte Spektrum enthält zwei deutlich erkennbare Peaks bei E=51.09keV und E=60.62keV [3]. Der erste Peak ist deutlich rechtsschief und hat ungewöhnliche Abstufungen, was uns vermuten ließ, dass dieser Peak aus mehreren sich überlagernden Peaks besteht. Diese Vermutung hat bestätigt, da es sich bei der Materialprobe eindeutig um das Element Ytterbium handelt [XRAY], welches in dem untersuchten Bereich K-Alpha-Linien besitzt.

Linie	Energie (keV)
<i>Yb</i> $K_{\alpha 3}$	50.846
<i>Yb</i> $K_{\alpha 2}$	51.354
<i>Yb</i> $K_{\alpha 1}$	52.389
<i>Yb</i> $K_{\beta 3}$	59.159
<i>Yb</i> $K_{\beta 1}$	59.382
<i>Yb</i> $K_{\beta 5}$	59.780
<i>Yb</i> $K_{\beta 2}$	60.962
<i>Yb</i> $K_{\beta 4}$	61.141

Tabelle 2: charakteristische Röntgenstrahlung von Yb [YBALPHA]

#### 4.4 Energieauflösung

Da sich die Halbwertsbreite aus einem näherungsweise konstanten Term, der durch das Rauschen bestimmt wird, und einem Term, der wegen statistischen Schwankungen in der Zahl der Elektron-Loch-Paaren proportional zu  $\sqrt{E}$  ist, zusammensetzt, haben wir die quadrierte Halbwertsbreite über der Energie aufgetragen und die Messpunkte linear gefittet.

$$(\Delta E_{FWHM})^2 = (\Delta E_{stat})^2 + (\Delta E_{Rauschen})^2 = a \cdot E + b$$

Und mit den ermittelten Fit-Parametern  $a=7.40\text{eV}$  und  $b=4.65\text{keV}$

$$\Delta E_{FWHM} = \sqrt{(7.40 \pm 0.02)\text{eV} \cdot E + (4.65 \pm 0.02)\text{keV}}$$

Für diesen Fit wurde der Wert der 59.5 keV Linie nicht berücksichtigt, da dieser deutlich von der Geraden abweicht. Möglicherweise ist der angenommene lineare Verlauf in diesem niedrigen Energiebereich nicht gültig.

#### 4.5 Alltagsgegenstand

Für die Analyse eines Gegenstandes des täglichen Lebens haben wir uns für die Badezimmerkachel entschieden. Die Kachel mit den Abmessungen 15cmx15cm wurde zentriert im Abstand von  $r_K = 51\text{mm} \pm 1\text{mm}$  vom Detektor platziert. Die Messzeit betrug 1899s. Nach dem das Untergrundspektrum abgezogen wurde, blieben immer noch gut erkennbare Energiepeaks[2]. Die meisten Peaks lassen sich den natürlichen Zerfallsreihen zuordnen [6].

Besonders offensichtlich ist, dass viele Zerfallslinien von  $^{235}\text{U}$  und dessen Zerfallsprodukten auftreten. Wahrscheinlich kommt dieses Element in der Kachel besonders häufig vor.

Um die Aktivität der Kachel abzuschätzen, vergleichen wir die Stärke einer markanten Linie mit denen der Eichquellen. Dazu ziehen wir die 185.7 keV Linie von  $^{235}\text{U}$  mit  $N = 30515$  heran. Dabei wird die Zählrate gewichtet mittels des Verzweungsverhältnisses  $b_k = 57.2\%$ , der Nachweiswahrscheinlichkeit  $\epsilon$  und deren näherungsweise Abstandsabhängigkeit  $\frac{1}{r^2}$ . Das Verhältnis ist dann

$$\beta = \frac{\dot{N}_k}{b_k \cdot \epsilon_k} \cdot \frac{b_Q \cdot \epsilon_Q}{\dot{N}_Q} \cdot \frac{r_k^2}{r_Q^2}$$

Dabei ist die Zählrate  $\dot{N} = \frac{N}{t_{\text{live}}}$ . Der Index k zeigt an, dass es sich um eine Größe der Uran-Linie, Q dass es sich um eine Eichquellen-Größe handelt. Der Fehler von  $\beta$  ergibt sich zu

$$\Delta\beta = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_k}{N_k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_Q}{N_Q}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta r_k}{r_k}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta r_Q}{r_Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon_k}{\epsilon_k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon_Q}{\epsilon_Q}\right)^2} \cdot \beta$$

Wobei  $\Delta N = \sqrt{N}$  und  $\epsilon_k = 0.190 \pm 0.103$ .

Eichquelle	Energie (keV)	$t_Q$ (s)	$N_Q$	$\epsilon_Q$	$\beta$
$^{241}\text{Am}$	59.5	49.560	12651.54	$0.307 \pm 0.014$	$0.0463 \pm 0.0252$
$^{137}\text{Cs}$	661.7	174.055	39772.23	$0.134 \pm 0.006$	$0.0534 \pm 0.0291$
$^{60}\text{Co}$	1173.2	352.580	16889.55	$0.077 \pm 0.004$	$0.1715 \pm 0.0935$
$^{60}\text{Co}$	1332.5	352.580	14760.64	$0.067 \pm 0.003$	$0.1715 \pm 0.0935$

Tabelle 3: Vergleich der Stärken der  $^{235}\text{U}$  Linie mit den Eichquellen

Die Aktivität liegt nach dieser Abschätzung unterhalb der der Eichquellen, bei etwa  $\frac{1}{20}$  der Americium-Eichquelle. Wenn man jedoch beachtet, dass mit mehreren dieser Kacheln ein Bad ausgekleidet war, in dem man sich täglich längere Zeit aufhält und damit einer starken Strahlenbelastung ausgesetzt ist, ist dieses Resultat bedenklich.

## 5 Quellen

### Literatur

- [ANLEITUNG] Anleitung zum Versuch 2.2b, Version vom: 02.10.2006
- [MAPPE] Literaturmappe zum Versuch 2.2b, Stand 28.10.2010
- [NUCDATA] <http://nucldata.nuclear.lu.se/NuclearData/toi/>, Stand: 28.10.2010



- [XRAY] <http://nucleardata.nuclear.lu.se/NuclearData/toi/xray.asp?act=search&Min=50&Max=52.5>, Stand: 10.11.2010
- [YBALPHA] <http://nucleardata.nuclear.lu.se/NuclearData/toi/xRay.asp?act=list&El=Yb>, Stand: 10.11.2010
- [DECAYDATA] [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm), Stand: 28.10.2010

## 6 Eigenständigkeitserklärung

Wir versichern hiermit, dass wir die vorliegende Ausarbeitung selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt haben. Die Stellen, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, haben wir durch die Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Darmstadt, 17.11.2010

Carl Böhmer, Maxim Singer

## A Anhang

Quelle	Isotop	$A_0$ (kBq)	Ref.Datum	$E_\gamma$ (keV)	br (%)	$T_{1/2}$ (a)	$A(t)*br$ (kBq)
GW 380	$^{137}Cs$	$45.7 \pm 3.0\%$	01.12.1999	661.7	84.99	30.05	30.2
GW 382	$^{60}Co$	$46.1 \pm 3.0\%$	01.12.1999	1332.5	99.85	5.271	11.0
				1173.2	99.98		11.0
?	$^{241}Am$	$41.8 \pm 3.0\%$	01.12.1999	59.54	35.9	432.6	14.7

Tabelle 4: Aktivität der Proben am Tag der Versuchsdurchführung

gemessen (keV)	Literaturwert (keV)	Isotop	Zerfallsreihe
2617.56	2614.53	$^{208}Tl$	Thorium
2204.28	2204.21	$^{214}Bi$	Uran-Radium
2105.04	2109.92	$^{214}Bi$	Uran-Radium
1766.17	1764.49	$^{214}Bi$	Uran-Radium
1591.97	1588.19	$^{228}Ac$	Thorium
1462.82	1460.86	$^{40}Ka$	-
1122.15	1120.29	$^{214}Bi$	Uran-Radium
970.22	968.97	$^{228}Ac$	Thorium
912.95	911.20	$^{228}Ac$	Thorium
730.79	727.33	$^{212}Bi$	Thorium
609.77	609.31	$^{214}Bi$	Uran-Radium
582.40	583.19	$^{208}Tl$	Thorium
512.38	510.77	$^{208}Tl$	Thorium
353.12	351.92	$^{214}U$	Uran-Radium
339.49	338.32	$^{228}Ac$	Thorium
296,78	295.22	$^{214}Pb$	Uran-Radium
239,62	241.99	$^{214}Pb$	Uran-Radium
186.63	186.21	$^{226}Ra$	Uran-Radium
86.23	85.43	$^{227}Th$	Uran-Actinium
74.43	74.96	$Pb K_{\alpha 1}$	-

Tabelle 5: Untergrundstrahlung

gemessen (keV)	Literaturwert (keV)	Isotop	Zerfallsreihe
2619.35	2614.53	$^{208}\text{Tl}$	Thorium
1766.63	1764.49	$^{214}\text{Bi}$	Uran-Radium
1462.86	1460.86	$^{40}\text{Ka}$	-
1122.98	1120.29	$^{214}\text{Bi}$	Uran-Radium
1003.45	1000.69	$^{228}\text{Ac}$	Thorium
788.62	785.37	$^{212}\text{Bi}$	Thorium
768.87	766.38	$^{234}\text{Pa}$	Uran-Radium
744.56	745.9	$^{234}\text{Pa}$	Uran-Radium
611.38	609.31	$^{214}\text{Bi}$	Uran-Radium
353.09	351.92	$^{214}\text{U}$	Uran-Radium
296.20	298	$^{214}\text{Po}$	Uran-Radium
258,76	256.25	$^{227}\text{Th}$	Uran-Actinium
205.91	205.31	$^{235}\text{U}$	Uran-Actinium
186.27	185.71	$^{235}\text{U}$	Uran-Actinium
163.85	163.36	$^{235}\text{U}$	Uran-Actinium
144.17	143.76	$^{235}\text{U}$	Uran-Actinium
112.23	113.5	$^{238}\text{U}$	Uran-Radium
101,26	100.0	$^{227}\text{Ac}$	Uran-Actinium
92.83	92.38, 92.80	$^{234}\text{Th}$	Uran-Radium
90,63	90.00	$^{227}\text{Th}$	Uran-Actinium
84.71	84.373	$^{228}\text{Th}$	Thorium
74.33	74.96	$Pb K_{\alpha 1}$	-
63.23	63.29	$^{234}\text{Th}$	Uran-Radium

Tabelle 6:  $\gamma$ -Linien der Badezimmerkachel. Energien, die nicht im Untergrund sichtbar sind, wurden hier grau schattiert.

Isotop	$\gamma$ -Energie (keV)
$^{238}\text{U}$	49.55, 113.5
$^{234}\text{Th}$	63.29, 92.38, 92.80
$^{234}\text{Pa}$	75.00, 131.30, 227.25, 569.5, 745.9, 766.38, 883.24, 926.72, 946.00
$^{234}\text{U}$	53.20, 120.90
$^{230}\text{Th}$	67.67, 143.87, 253.73
$^{226}\text{Ra}$	186.21, 262.27, 600.66
$^{222}\text{Rn}$	511
$^{218}\text{Po}$	-
$^{214}\text{Pb}$	241.99, 295.22, 351.93
$^{214}\text{Bi}$	609.31, 1120.29, 1238.11, 1764.49, 2204.21
$^{214}\text{Po}$	298, 799.7
$^{210}\text{Pb}$	46.54
$^{210}\text{Bi}$	265.83, 304.90
$^{210}\text{Po}$	803.10
$^{206}\text{Pb}$	stabil

Tabelle 7: Uran-Radium-Zerfallsreihe [NUCDATA]

Isotop	$\gamma$ -Energie (keV)
$^{235}\text{U}$	143.76, 163.36, 185.71, 205.31
$^{231}\text{Th}$	25.65, 84.22
$^{231}\text{Pa}$	27.36, 283.69, 300.07, 302.65, 330.06
$^{227}\text{Ac}$	69.21, 100, 160.26
$^{227}\text{Th}$	50.13, 85.43, 90.00, 93.93, 235.97, 256.25
$^{223}\text{Ra}$	122.32, 144.23, 154.21, 269.46, 323.87, 338.28, 445.03
$^{219}\text{Rn}$	271.23, 401.81
$^{215}\text{Po}$	438.8
$^{211}\text{Pb}$	404.85, 427.09, 832.01,
$^{211}\text{Bi}$	351.06
$^{207}\text{Tl}$	328.12, 569.702, 897.80
$^{207}\text{Pb}$	stabil

Tabelle 8: Uran-Actinium-Zerfallsreihe [NUCDATA]

Isotop	$\gamma$ -Energie (keV)
$^{232}\text{Th}$	63.83, 140.86
$^{228}\text{Ra}$	12.75, 13.52, 16.2
$^{228}\text{Ac}$	338.32, 463.00, 794.95, 911.20, 964.77, 968.97
$^{228}\text{Th}$	84.37, 131.61, 215.98
$^{224}\text{Ra}$	240.99, 292.70, 645.50
$^{220}\text{Rn}$	549.76
$^{216}\text{Po}$	804.9
$^{212}\text{Pb}$	115.18, 238.63, 300.09
$^{212}\text{Bi}$	39.86, 727.33, 785.37, 1620.50
$^{208}\text{Tl}$	277.35, 510.77, 583.19, 860.56, 2614.53
$^{212}\text{Po}$	-
$^{208}\text{Pb}$	stabil

Tabelle 9: Thorium-Zerfallsreihe [NUCDATA]

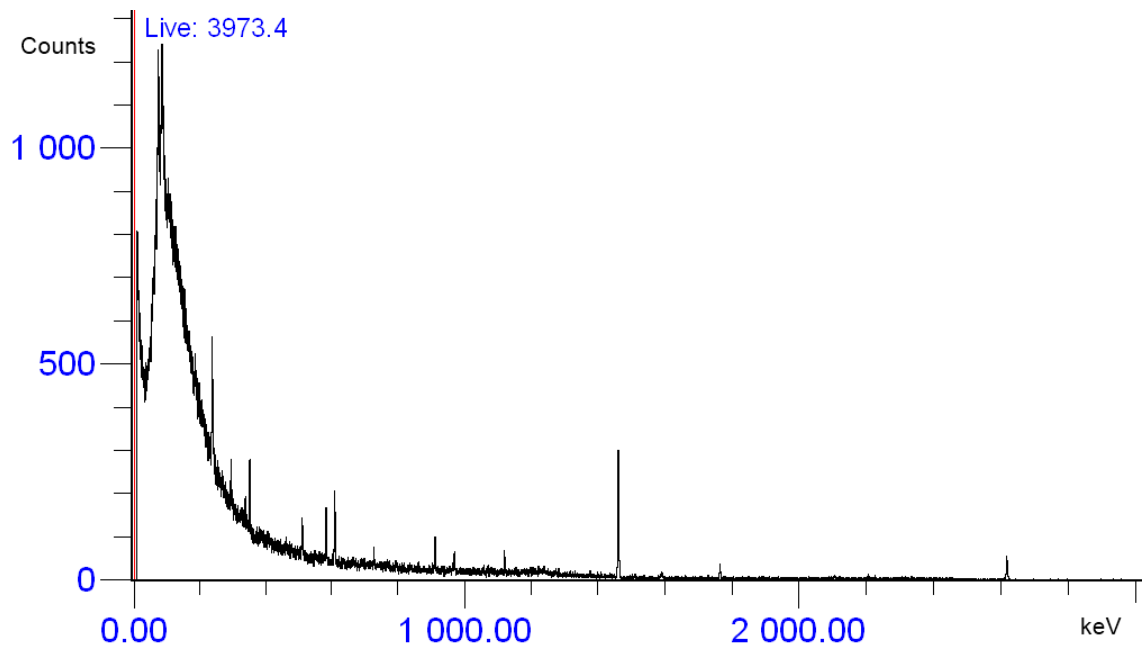


Abbildung 1: Untergrundspektrum

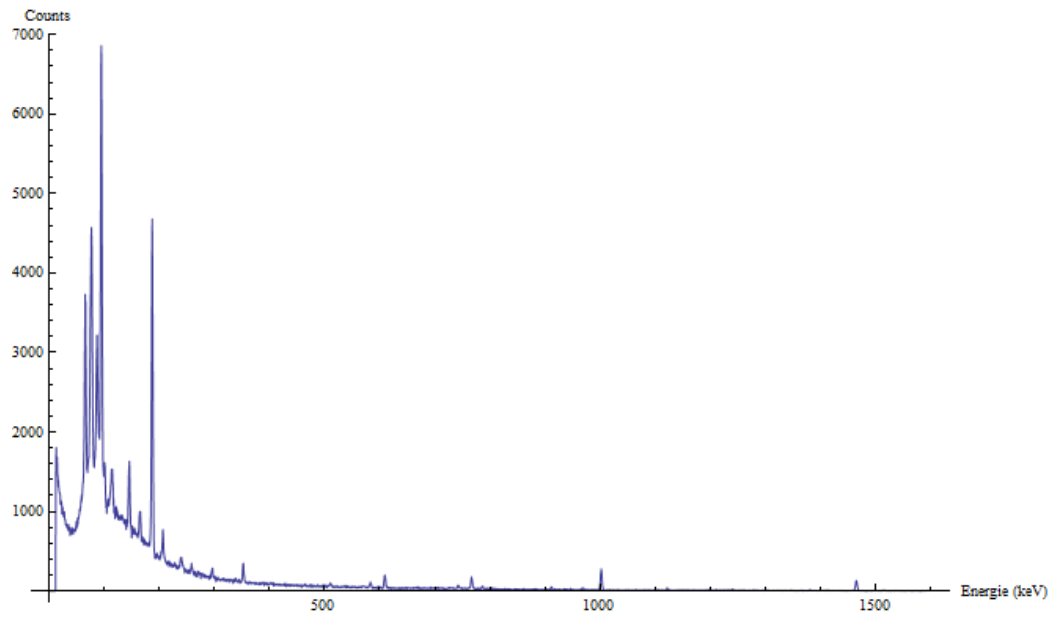


Abbildung 2: Spektrum einer Badezimmerkachel

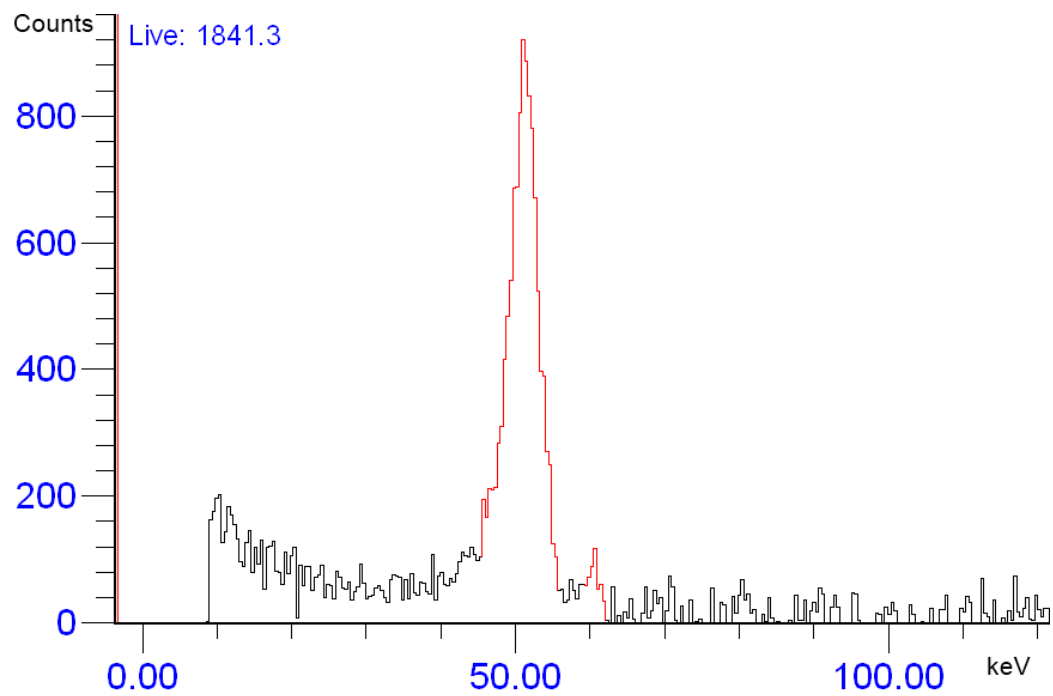


Abbildung 3: Spektrum der Materialprobe Nr 5

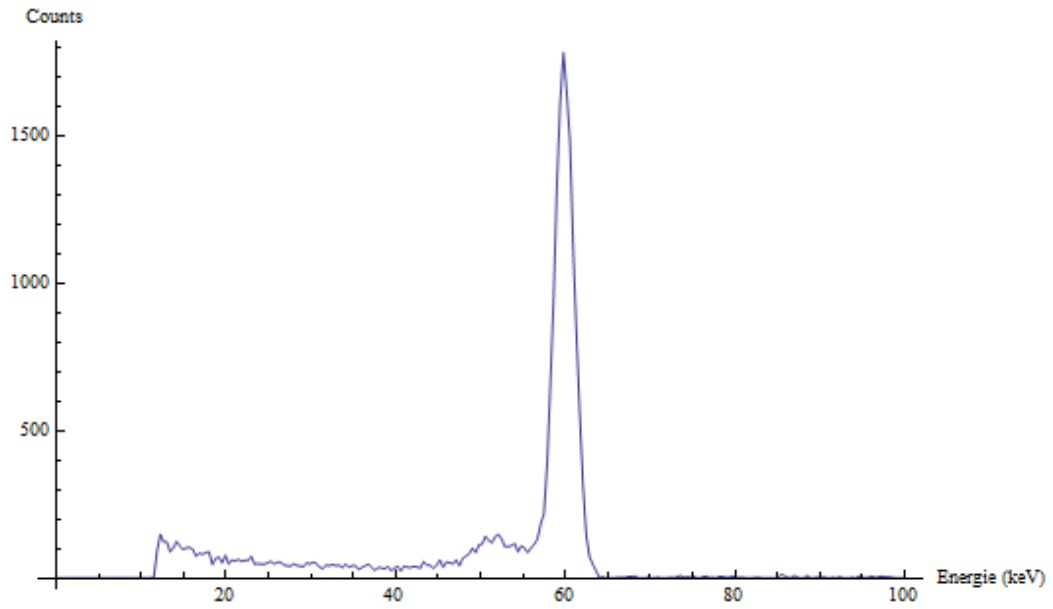


Abbildung 4: Spektrum von  $^{241}\text{Am}$

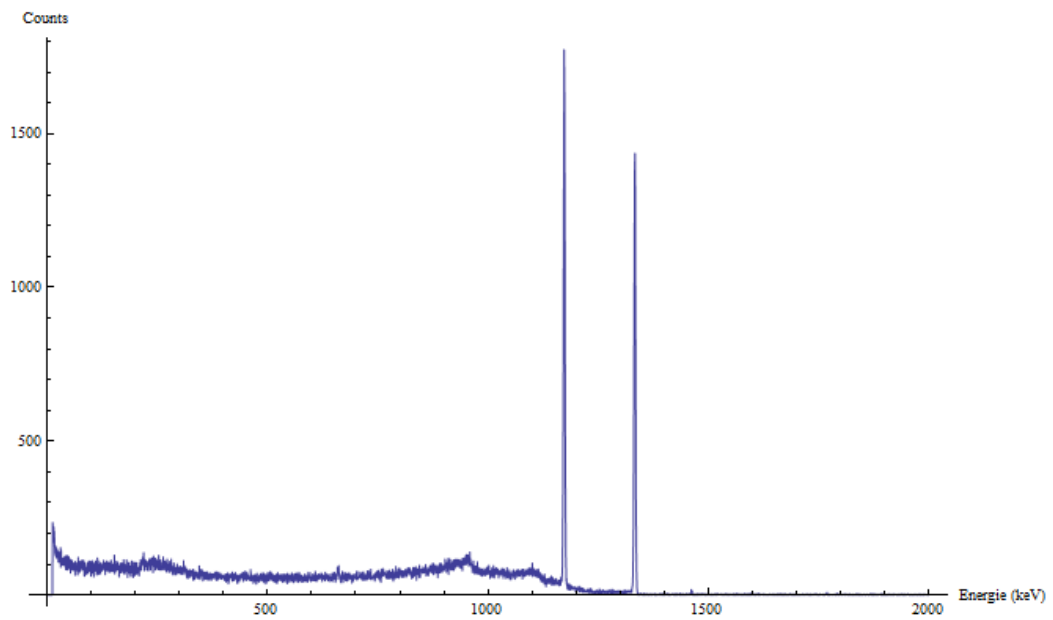


Abbildung 5: Spektrum von  $^{60}\text{Co}$

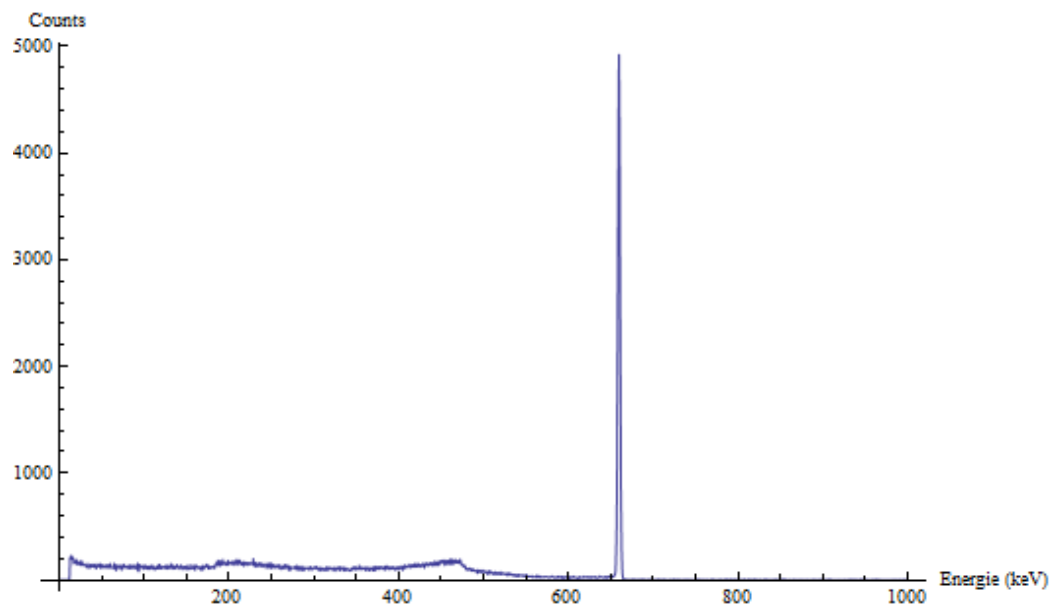


Abbildung 6: Spektrum von  $^{137}\text{Cs}$

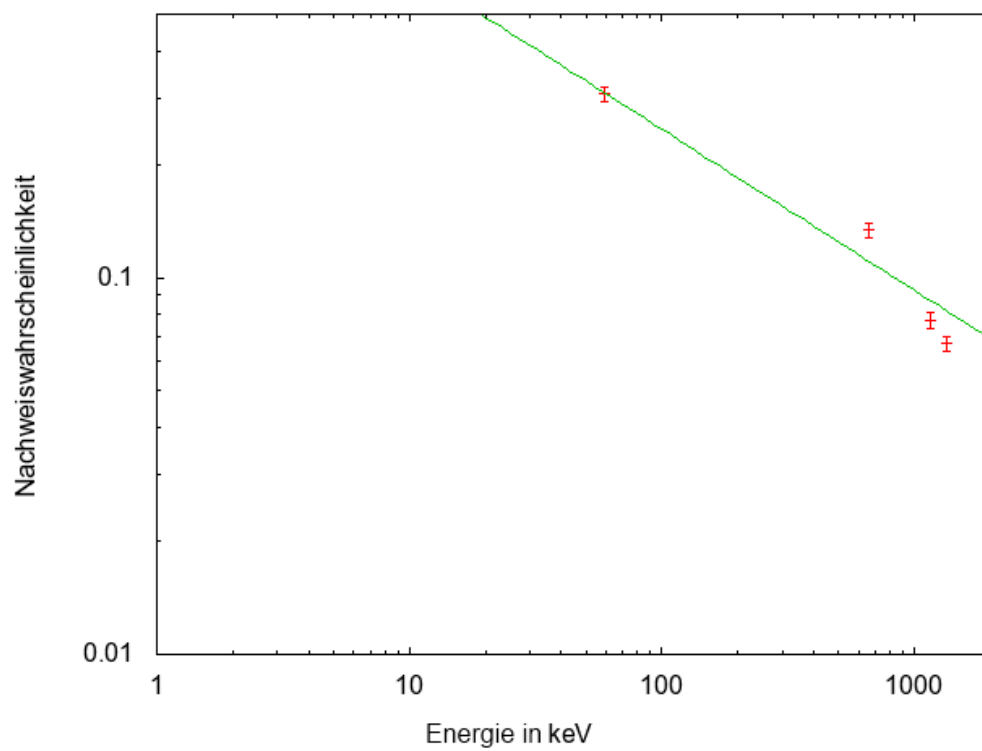


Abbildung 7: Nachweiswahrscheinlichkeit



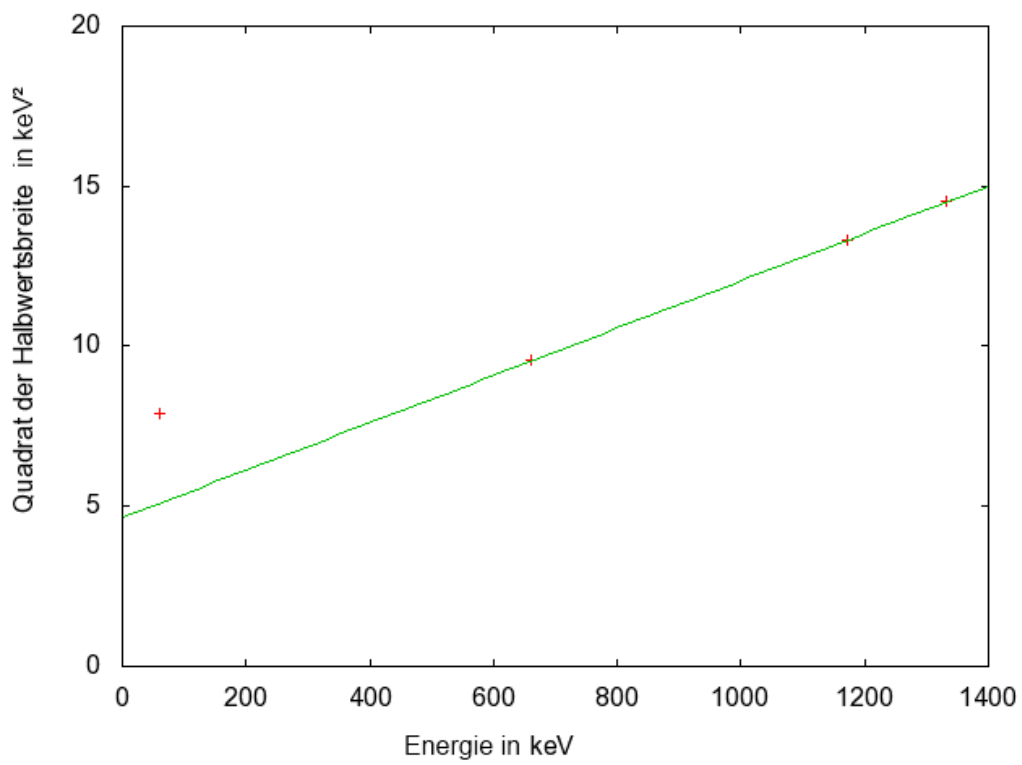


Abbildung 8: Quadrat der Halbwertsbreite in Abhängigkeit von der Energie

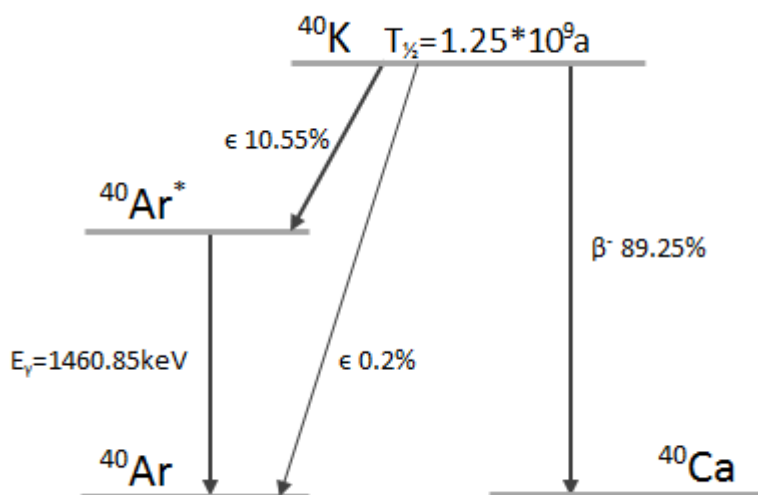


Abbildung 9: Zerfallsschema von  $^{40}\text{K}$