

RADIOAKTIVITÄT (RAD)

DANIEL DOLINSKY UND JOHANNES VRANA

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
2. Funktionsprinzip eines Szintillationszählers	2
3. Messungen und Aufgaben	3
3.1. Messung 1: Aufnahme bekannter Spektren zur Eichung des Vielkanalanalysators	3
3.2. Aufgabe 1: Energie - Kanal - Diagramm	5
3.3. Messung 2: Untergrundstrahlung	5
3.4. Aufgabe 2: natürliche Strahlenbelastung	6
3.5. Aufgabe 3: Strahlung von ^{137}Cs	7
3.6. Messung 3: Kaliumcarbonat	7
3.7. Aufgabe 4: Aktivität des ^{40}K	8
3.8. Messung 4: Uran- und Thoriumminerale	9
3.9. Messung 5: Tschernobylprobe	11
3.10. Aufgabe 5: „Essen“ der Tschernobylprobe	11
3.11. Messung 6: Uranoxid, Thoriummetall und Granitstein	12
3.12. Messung 7: Höhenstrahlung	14
3.13. Aufgabe 6: Strahlenbelastung durch Höhenstrahlung	14
4. Fragen	16

1 EINLEITUNG

Dieser Versuch soll einen Einblick in den Bereich der ionisierenden Strahlung - also der Radioaktivität - geben.

Dazu wird ein Szintillationszähler mit einem NaI-Kristall verwendet, wobei die Elektronenmultiplierspannung (PMT) bei 850 V lag. Ausnahme: Messung 7; hier mußte sie auf 510 V eingestellt werden, da die Quanten der hier gemessenen Höhenstrahlung sehr viel mehr Energie als die γ -Strahlung der Präparate besitzen.

2 FUNKTIONSPRINZIP EINES SZINTILLATIONSZÄHLERS

Die einfallenden γ -Quanten werden im NaI-Kristall durch Photo-, Compton-, und Paarbildungseffekte absorbiert. Dabei lösen sie schnelle Elektronen aus dem Atomverband, welche wiederum die im Kristall eingelagerten Thallium-Atome zur Aussendung monochromatischen Lichts anregen. Dieses Licht wird in einer aufgeklebten Photokathode in Elektronen umgewandelt, die in dem sogenannten Elektronenmultiplier über eine Beschleunigungsspannung Sekundärelektronen aus den Metallplatten ionisieren und eine Elektronenlawine auslösen. Dieses Signal wird nun in einem Vorverstärker für den D/A-Wandler aufbereitet. Der 10 Bit D/A-Wandler sortiert nun die Signalhöhe, die proportional zur absorbierten Energie ist, in 1024 Kanäle.

Auf dem Ausgabegraphen wird dann die Teilchenzahl n logarithmisch über den Kanälen aufgetragen.

Am interessantesten sind hierbei die sogenannten Peaks, welche zeigen, daß auch der Kern eines Atoms diskrete Energieniveaus besitzen muß, da die γ -Linien für jedes Element spezifisch und charakterisierend sind.

Alle in dieser Ausarbeitung enthaltenen Graphen sind nach Abzug der Untergrundstrahlung aufgetragen. Zum besseren Erkennen markanter Peaks sind die Graphen teilweise nicht logarithmisch aufgetragen.

3 MESSUNGEN UND AUFGABEN

3.1 Messung 1: Aufnahme bekannter Spektren zur Eichung des Vielkanalanalysators

Element	Energie/ keV	Kanal
^{60}Co	1173	421
^{60}Co	1333	475
^{60}Co	2506	875
^{22}Na	511	193
^{22}Na	1276	455
^{22}Na	1787	636
^{137}Cs	662	250

Als Eichquellen standen ^{60}Co , ^{22}Na , und ^{137}Cs zur Verfügung. Durch den Vergleich der Energie dieser Linien und der dazugehörigen Kanäle kann man ein Diagramm aus Energie und Kanalnummer einzeichnen. Dabei ergibt sich eine Gerade, so daß für die weitere Betrachtung ein linearer Zusammenhang der beiden Größen angenommen werden kann. Es ist eine leichte, für unsere Abschätzung aber unerhebliche Abweichung von einer Geraden festzustellen. Ob dies an den Meßungenauigkeiten liegt, an der nicht ganz konstanten Spannung des Netzteils, oder ob es sich um eine Nichtlinearität der Registrierungsapparatur handelt, kann nicht eindeutig entschieden werden.

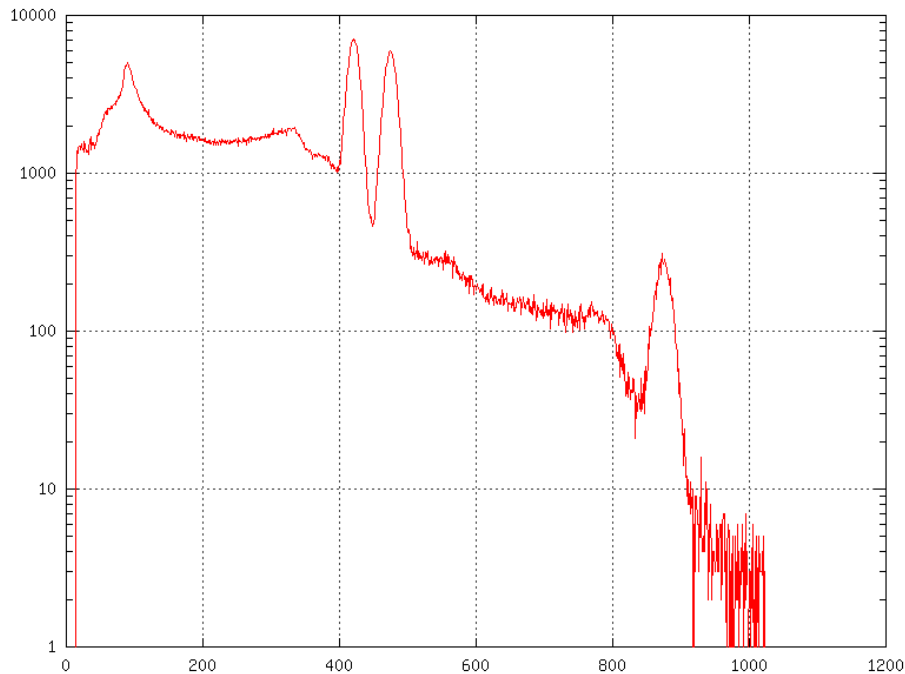


ABBILDUNG 1. Cobalt

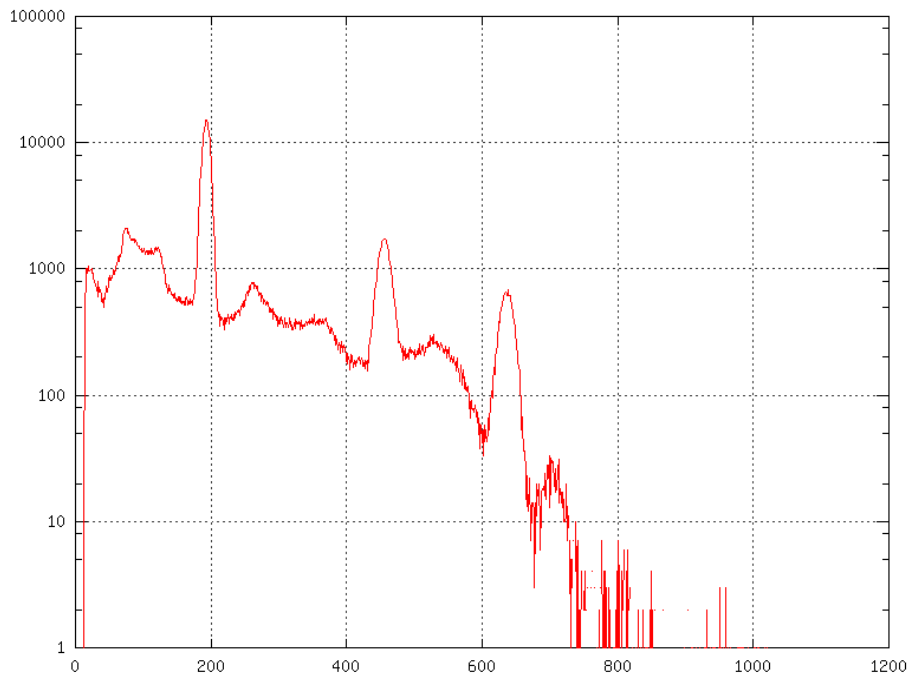


ABBILDUNG 2. Natrium

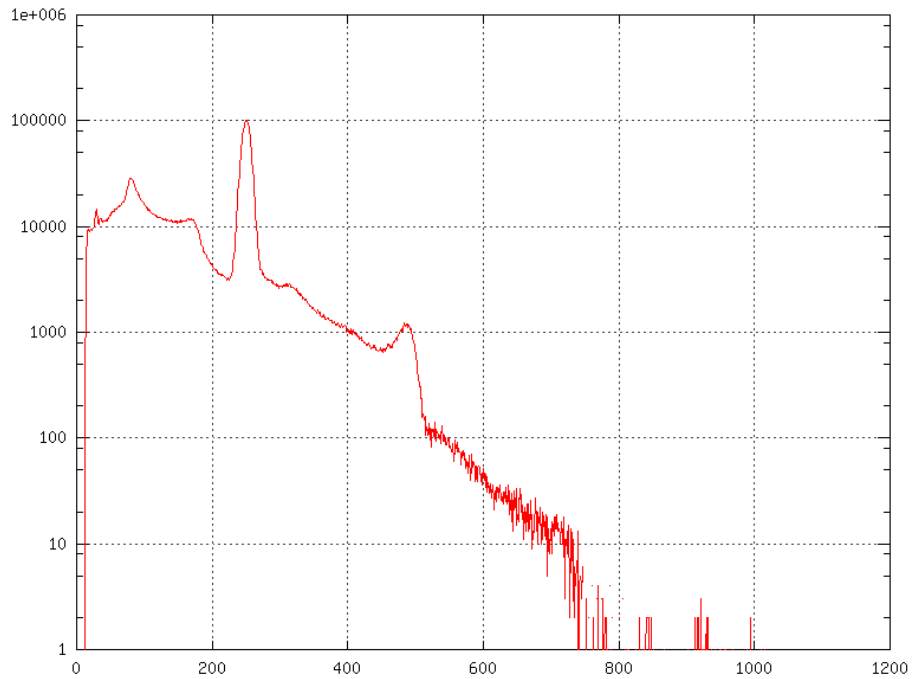


ABBILDUNG 3. Caesium

3.2 Aufgabe 1: Energie - Kanal - Diagramm

Es läßt sich keine außergewöhnliche Abweichung von einer Geraden feststellen. Die Steigerung der Kanalzahl ist direkt proportional zur absorbierten Energie des einfallenden Teilchens. Daher wird diese Zählrohrart auch als Proportionalzähler bezeichnet.

3.3 Messung 2: Untergrundstrahlung

1. ohne Bleiabschirmung

Nach einer Messung von 10 Minuten erhält man als Gesamtzählrate (des gesamten gemessenen Spektrums) $Z_1 = 250255 \pm 500$. Es ist jedoch zu beachten, daß nur in einem relativ schmalen Energiebereich gemessen wird. Für eine Abschätzung der Größenordnung ist die Zählrate Z_1 dennoch verwendbar.

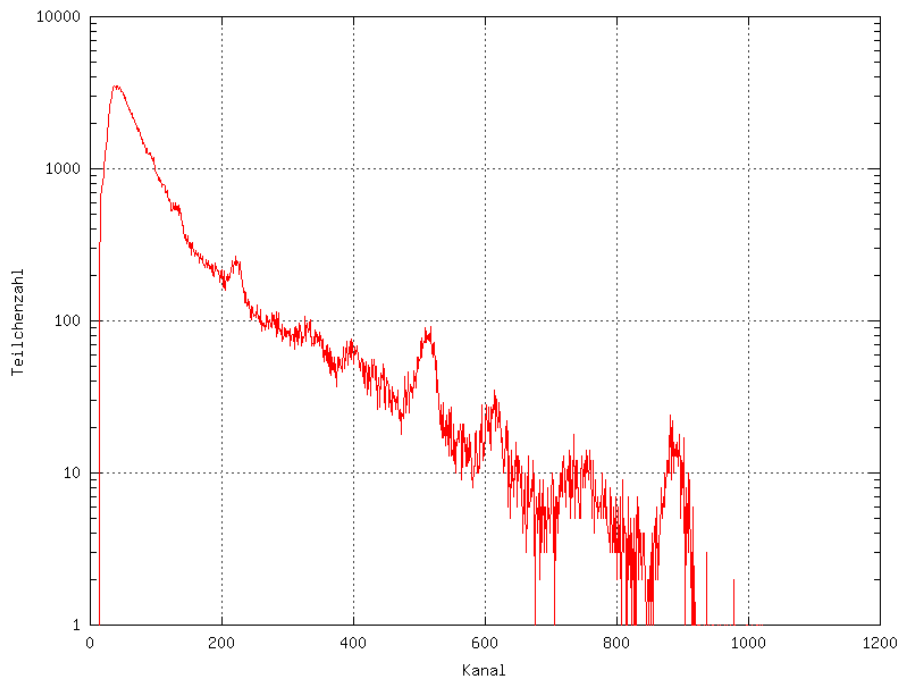


ABBILDUNG 4. Untergrundstrahlung ohne Bleiabschirmung

2. mit Bleiabschirmung

Die Abschirmung mit Blei erfolgte von vier Seiten, von unten kommende Strahlung wurde nur vom Tisch und der Aluplatte des Zählers abgeschirmt. Dies gilt auch für die folgenden Messungen. Bei einer ebenfalls zehnmütigen Messung der Untergrundstrahlung war die Zählrate mit $Z_2 = 84441 \pm 291$ niedriger.

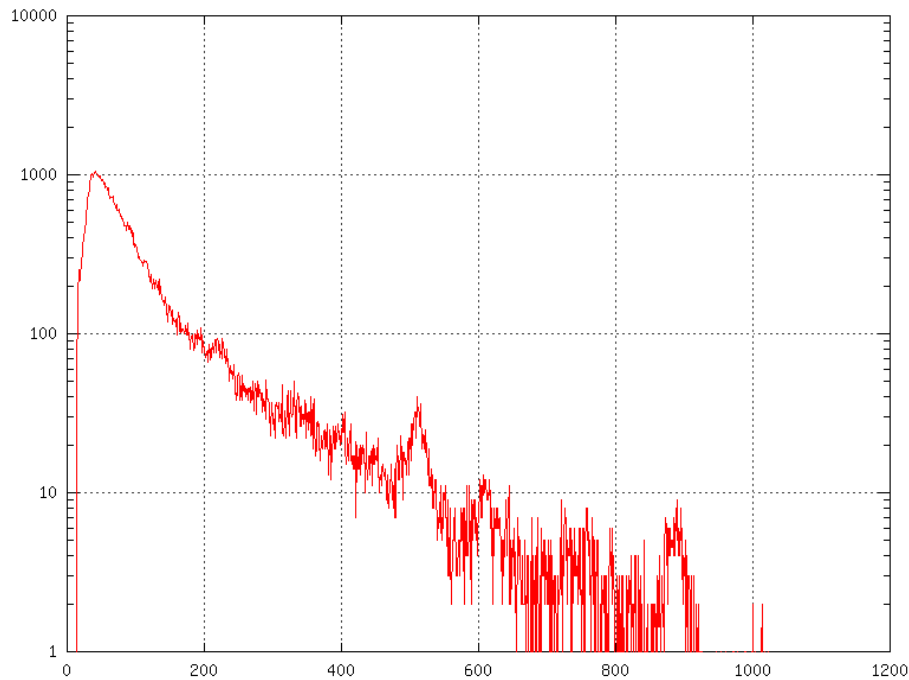


ABBILDUNG 5. Untergrundstrahlung mit Bleiabschirmung

3.4 Aufgabe 2: natürliche Strahlenbelastung

Zeit: $t = 600$ s

ROI-Int.: 250255 ± 500

mittlere Energie: $\bar{E} = 100$ keV

Dichte: $\rho = 3,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Radius: $r = 3,81$ cm

Länge: $l = 7,62$ cm

Masse: $m = \rho \pi r^2 l = 1,286$ kg Bewertungsfaktor: $q = 1$

$$H = q \cdot D = q \cdot \frac{\Delta W}{\Delta m} = \frac{100 \text{ keV} \cdot 250255 \cdot \frac{24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 364,26}{600}}{1,286 \text{ kg}} = 1,6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Sv}}{\text{a}}$$

D : Energiedosis ΔW : absorbierte Strahlungsenergie

3.5 Aufgabe 3: Strahlung von ^{137}Cs

$$^{137}\text{Cs}: T_{1/2} = 30,2\text{a}$$

$$A(1990) = 333\text{kBq}$$

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ mit } \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$A(1999) = A(1990) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot (1999-1990)} = 333\text{kBq} \cdot e^{-\frac{9\text{a} \cdot \ln 2}{30,2\text{a}}} = 271\text{kBq}$$

$$\frac{0,3\text{m}}{1\text{m}} = \tan \frac{\alpha}{2}$$

$$\Rightarrow \alpha = 33,4^\circ$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \frac{33,4^\circ}{360^\circ} = 0,0928$$

$$E = A(1999) \cdot 662\text{ keV} \cdot \varepsilon \cdot 1\text{a} = 0,0839\text{ J}$$

$$H = \frac{E}{m} = \frac{0,0839\text{ J}}{80\text{ kg}} = 1,05\text{ mSv}$$

3.6 Messung 3: Kaliumcarbonat

Die γ -Quanten-Linie liegt für ^{40}K bei 1471 keV. Es werden deshalb die Kanäle 478-542 berücksichtigt. Das Maximum liegt bei Kanal 514. In diesem Bereich liegen 3668 ± 61 Zerfälle. Zieht man davon den Strahlungsuntergrund mit Bleiabschirmung von 1195 ± 35 ab, so erhält man eine Zählrate von 2473 ± 71 .

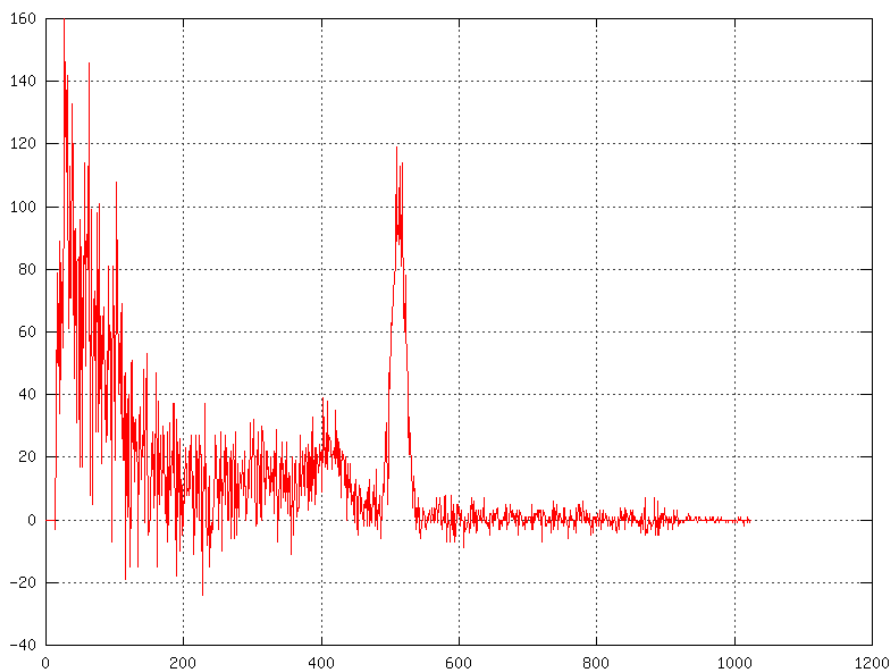


ABBILDUNG 6. K_2CO_3

3.7 Aufgabe 4: Aktivität des ^{40}K

$$K_2CO_3 : 138,2058 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$^{40}\text{K} : T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9 \text{a}$$

$$\frac{100 \text{g}}{138,2058 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,72 \text{ mol}$$

$$N = 0,72 \text{ mol} \cdot 2 \cdot N_A = 8,71 \cdot 10^{23} \text{ Atome}$$

$$\Rightarrow N_{^{40}\text{K}} = 8,71 \cdot 10^{19} \text{ Atome}$$

Probe: 100,34 g

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N(t) = 1,5 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{s}} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$$

In 10 Minuten:

$$e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \approx 1$$

$$A(600 \text{ s}) = 9,0 \cdot 10^5$$

ROI-Int: 2473

$$\text{Trefferquote: } \frac{2473}{A(600 \text{ s})} = 0,275\%$$

Die geringe Trefferquote beim Auffangen der Strahlung rührt einerseits daher, daß das Zählrohr nur ein sehr geringes Raumwinkelelement einnimmt. Deshalb gelangen selbst für den Fall, daß das Präparat direkt an der Frontseite des Detektors liegt, nur maximal 50% der Strahlungsquanten in selbigen. Die Mehrheit der Quanten gelangen also erst gar nicht in den Szintillationskristall.

Außerdem besitzt der Detektor eine sogenannte Totzeit, d.h. das Zählrohr hatte soeben ausgelöst und die Dynoden (Elektronenmultiplier) haben sich entladen. Aufgrund der Widerstände zwischen den Dynoden, haben diese keine beliebig lange Ladezeit. Fällt in dieser Totzeit ein γ -Quant in den Detektor, so kann keine Elektronenlawine ausgelöst werden, und das γ -Quant wird nicht registriert.

3.8 Messung 4: Uran- und Thoriummineralien

Das Spektrum einer Uranprobe wurde 2 Minuten lang aufgezeichnet, und zu den auftretenden Peaks die Kanalnummer bestimmt. Eine Reihe von Isotopen können anhand ihrer charakteristischen Peaks identifiziert werden:

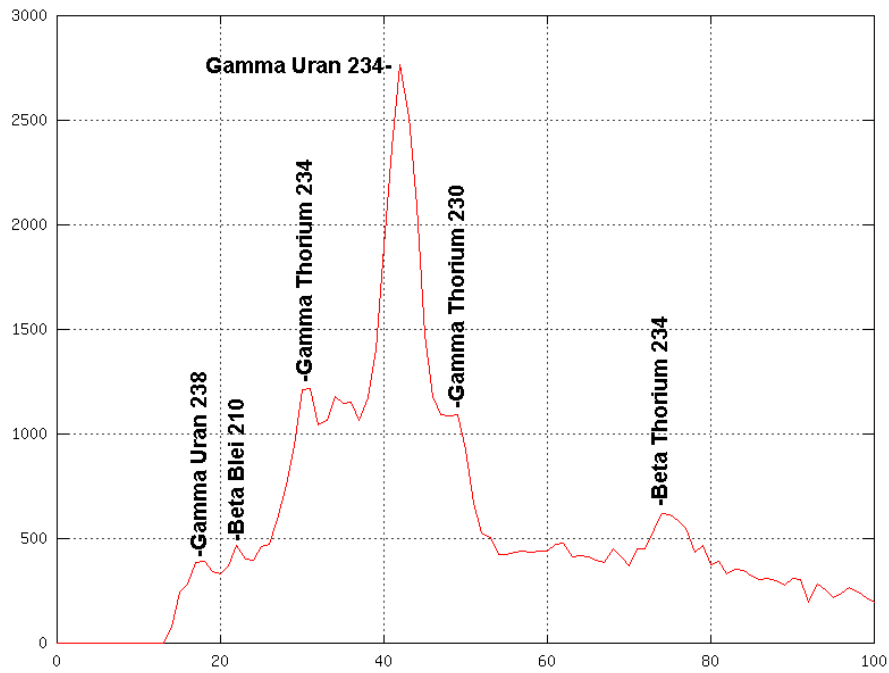


ABBILDUNG 7. Uran (Ausschnittvergrößerung)

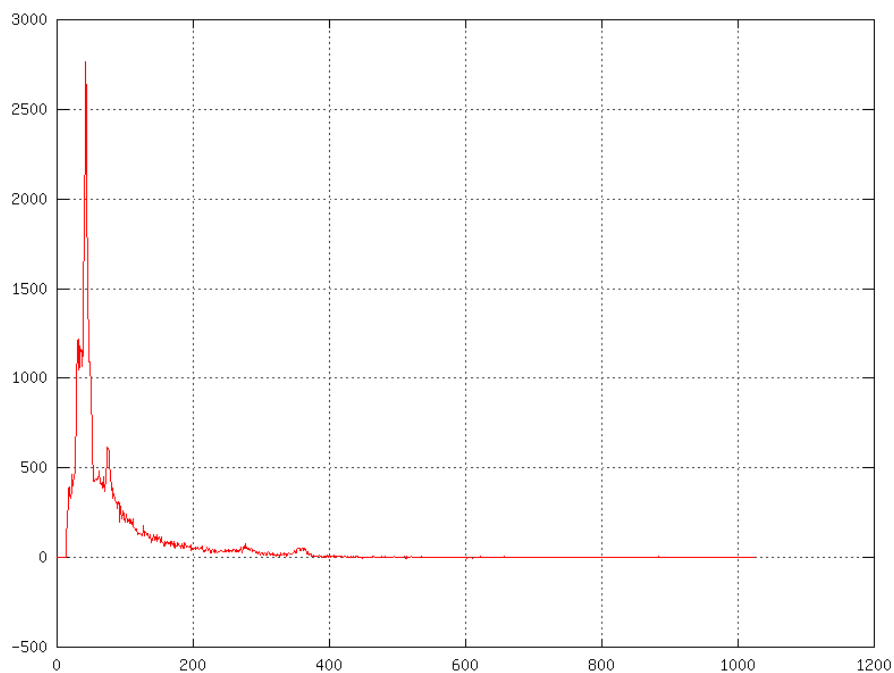


ABBILDUNG 8. Uran

Bei Thorit können für folgende Photopeaks Isotopen aus der Thoriumreihe zugeordnet werden (Meßzeit 120 s).

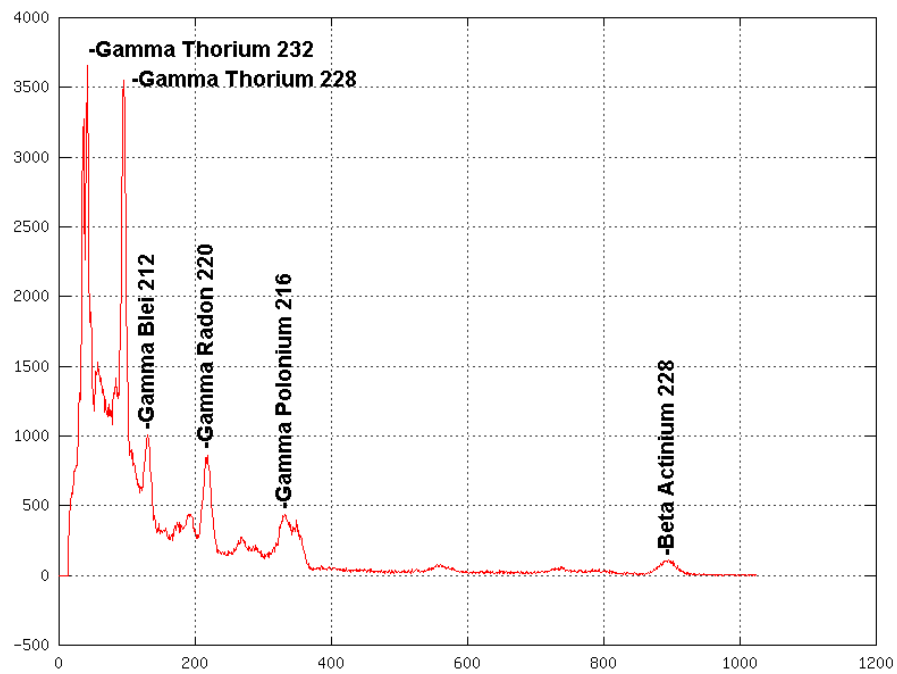


ABBILDUNG 9. Thorium

3.9 Messung 5: Tschernobylprobe

Es wurde 450 s lang das Spektrum der Probe registriert, und die Peaks ausgewertet. Es ließ sich ein Peak (Maximum bei Kanal 243) eindeutig zuordnen. Dieser gehört zu ^{137}Cs (662keV).

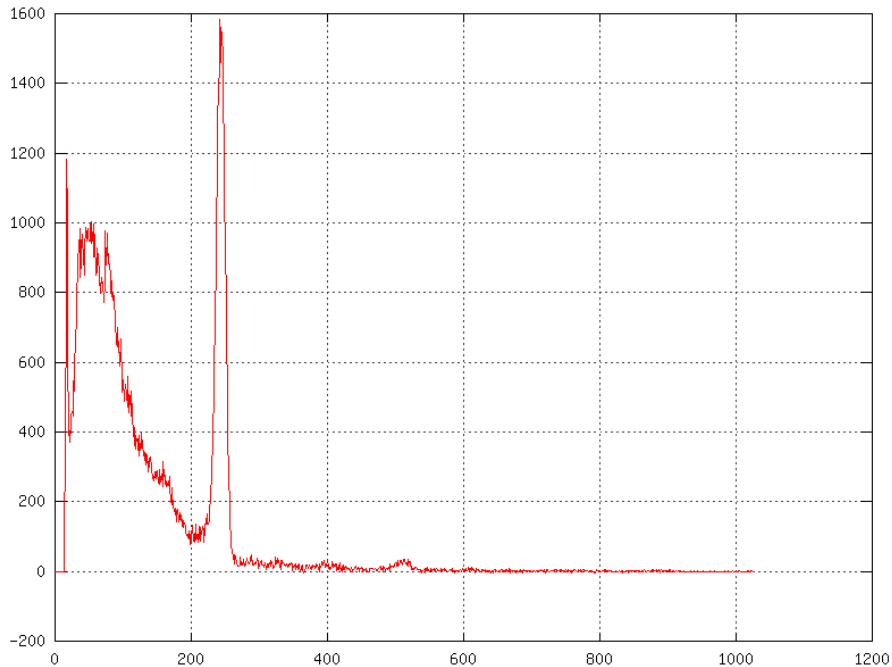


ABBILDUNG 10. Tschernobylprobe aus Bayern

3.10 Aufgabe 5: „Essen“ der Tschernobylprobe

Strahlenbelastung durch Aufnahme des ^{137}Cs unter der Annahme, daß die Quanten zu 100% registriert werden.

ROI-Int.: 193894

$t = 7\text{d}$

$m = 375\text{ g}$

$W = 662\text{ keV}$

$t_{\text{meß}} = 450\text{ s}$

$$H = 1 \cdot D = \frac{\Delta W}{\Delta m} = \frac{193894}{450\text{ s}} \cdot 7\text{d} \cdot 662\text{ keV} = 0,345\ \mu\text{Sv}$$

3.11 Messung 6: Uranoxid, Thoriummetall und Granitstein

Bei Uranoxid fanden sich Peaks für folgende Isotopen aus der Uran-Actinium- bzw. Thorium-Zerfallsreihe:

γ - ^{231}Th , γ - ^{235}U , γ - ^{228}Th , γ - ^{227}Th , γ - ^{231}Pa , γ - ^{220}Rn , γ - ^{228}Ac , β - ^{211}Pb .

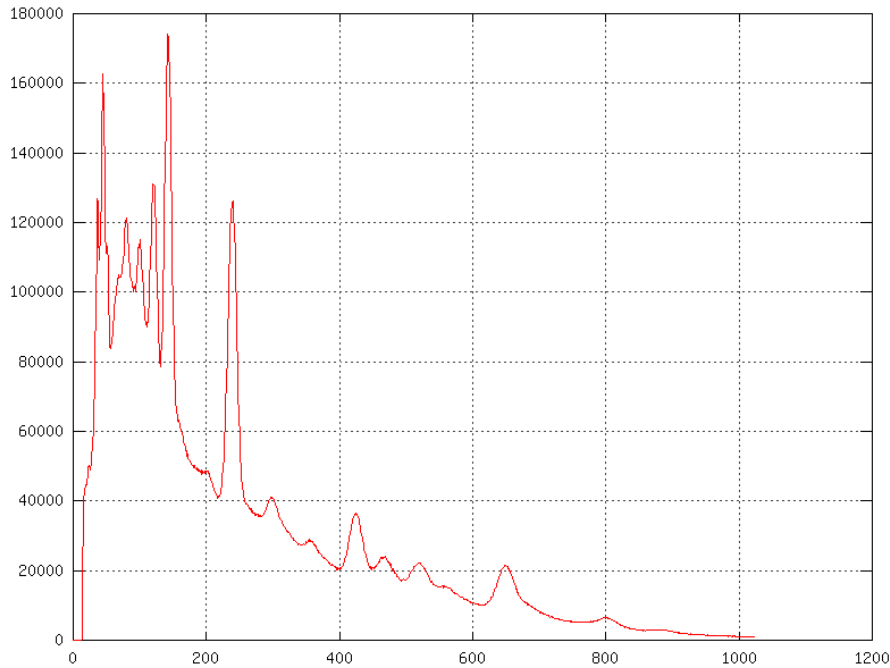


ABBILDUNG 11. Uranoxid

Im Thoriummetall fanden sich nicht nur die bei Uranoxid genannten Isotopen, sondern auch noch γ - ^{230}Th und γ - ^{234}Th (Uran-Radium-Reihe) und deren Zerfallsprodukte.

Der Peak in der Granit-Messung dürfte auf den γ -Zerfall von ^{234}U und ^{230}Th zurückzuführen sein.

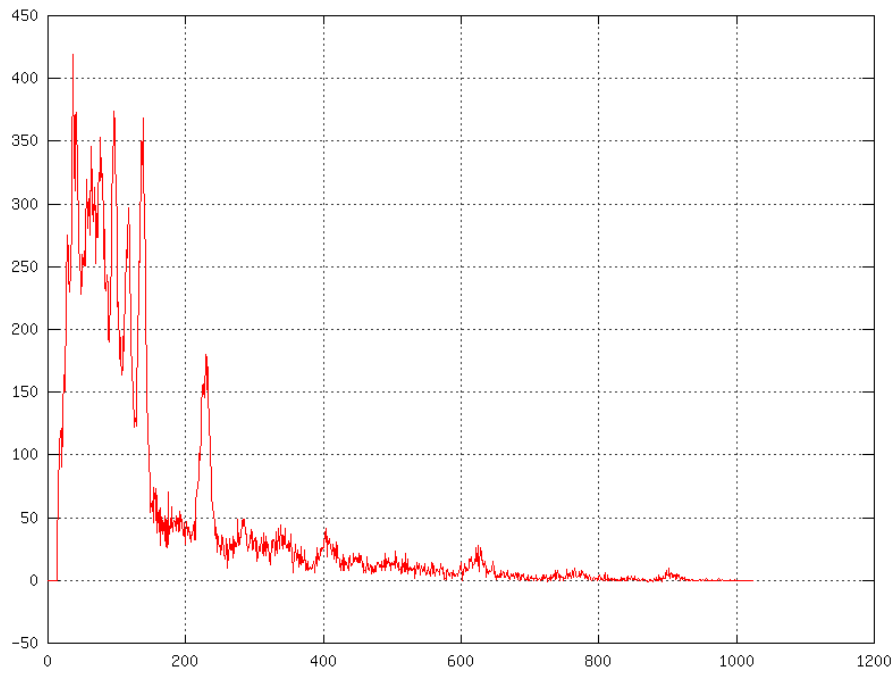


ABBILDUNG 12. Thoriummetall

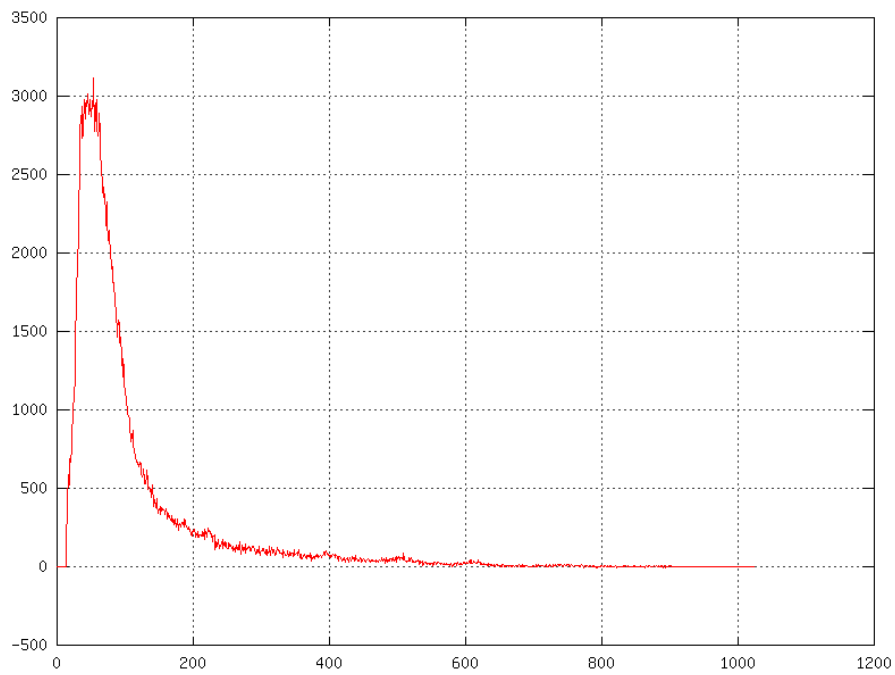


ABBILDUNG 13. Granitstein

3.12 Messung 7: Höhenstrahlung

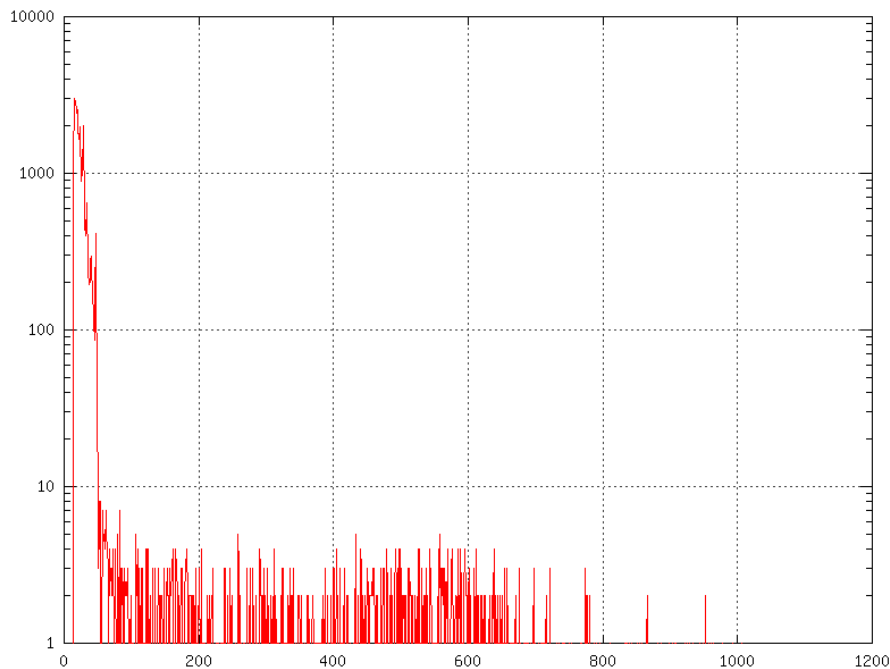


ABBILDUNG 14. Höhenstrahlung

3.13 Aufgabe 6: Strahlenbelastung durch Höhenstrahlung

Kanal	ROI-Int. (n)	\bar{E}/MeV	$\bar{E}/10^{-12}\text{ J}$	$\bar{E} \cdot n/\text{GeV}$
100-199	161	7,52	1,21	1,211
200-299	104	12,54	2,01	1,304
300-399	98	17,55	2,81	1,720
400-499	148	22,57	3,62	3,340
500-599	168	27,59	4,42	4,634
600-699	103	32,60	5,22	3,358
700-799	36	37,62	6,03	1,354
800-899	17	42,63	6,83	0,725
900-999	16	47,65	7,63	0,762

$$E = 18,409 \text{ GeV}$$

Man kann aufgrund der Lage der drei ^{60}Co -Linien näherungsweise die Energie in Abhängigkeit von der Kanalnummer berechnen. Dabei wird eine lineare Beziehung angenommen, auch wenn das sicher nur annähernd richtig ist. Es gilt näherungsweise $E = \text{Kanalnummern} \cdot 50 \text{ keV}$.

Zu den einzelnen Intervallen in der Tabelle berechnet man die Energie jeweils mit einem mittleren Wert und addiert die mittleren Energien der einzelnen Teilintervalle. Für die gesamte in den 15 Minuten in den Kanälen 100-999 absorbierte Energie erhält man folgenden Wert: $E = 18,4 \text{ GeV}$.

Auf ein Jahr erhält man pro kg eine Energie von $E = 6,44 \cdot 10^{14} \text{ eV} = 1,03 \cdot 10^{-4} \text{ J}$. Als Strahlenbelastung in einem Jahr ergibt sich, wenn man die Detektormasse berücksichtigt eine Äquivalenzdosis $\dot{A}Q = 0,060 \text{ mSv}$.

Die Größenordnung der Abschätzung ist in etwa richtig, weicht jedoch vom angegebenen Wert 0,35mSv doch erheblich ab. Ein Grund dafür ist sicher die fehlende, aber angenommene Linearität zwischen Kanalnummer und Energie und zum anderen die Gleichsetzung des menschlichen Körpers mit der Detektormasse. Auch ist die Meßzeit wohl etwas gering. Größere Meßzeiten sollten einen genaueren Wert ergeben.

4 FRAGEN

1. 1 keV ist die Energie, die ein einfach geladenes Teilchen erhält, wenn es die Spannung von 1kV durchläuft. Die Energie $4 \cdot 10^{12}$ GeV beträgt 640J. Dies entspricht der Energie, die nötig ist, um 10 kg ca. 6,4 m zu heben.
2. Die Breite liegt an der Unschärfe $\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{h}{2\pi}$. Es läßt sich die Energie bei einer endlichen Zeit nicht genau bestimmen. Daraus ergibt sich die Unschärfe (Peak) in der Energie. Die vielen Rekombinationen erfolgen nicht alle simultan, sondern sind statistisch um einen Mittelwert verteilt. man erhält eine Verteilungsfunktion, deren Breite bei halber Höhe des Maximums ein Maß für die Form (die Breite) der registrierten Linie ist.
3. Die 511 keV-Linie des Na-Spektrums ist die Energie eines der zwei γ -Quanten aus der Paarvernichtung des γ -Zerfalls. Die 1270 keV-Linie ist eine von Na emittierte Strahlung. Die 1787 keV erhält man bei gleichzeitiger Registrierung der 511 keV und der 1276 keV Linien.
4. Durch die Strahlung werden auch aus den Blei-Atomen in der Abschirmung Elektronen herausgeschlagen, man erhält das charakteristische Röntgenspektrum von Blei (hier: K-Linie bei 77 keV).
5. Bei hohen Zählraten wächst der Fehler nicht so stark an wie die Zählrate selbst. Dies bedeutet, daß bei hohen Zählraten der relative statistische Fehler immer geringer wird.
6. Da die Zerfallsprodukte der langlebigen Präparate wie z.B. Ra teilweise kurzlebig sind, wächst die Aktivität so lange, bis genauso viele Tochterkerne zerfallen, wie gebildet werden. Man nennt dies radioaktives Gleichgewicht. Erst nachdem dieser Zustand erreicht ist, nimmt die Aktivität langsam ab.
7. α -Strahlung (Heliumkerne) besitzen ein großes Ionisationsvermögen und kann schon durch Papier abgeschirmt werden. β -Teilchen ionisieren weniger und benötigen Blei-Schichten von einigen cm zur Abschirmung. γ -Strahlung können durch Entfernung (Abstandsgesetz für elektromagnetische Wellen, gilt auch für obengenannte Teilchen) und durch dicke Bleiplatten abgeschirmt werden. Kosmische Strahlung ist sehr durchdringend und kann nur in großer Tiefe in der Erde abgeschirmt werden.
8. Bei der 2615 keV-Linie des Thorium-Folgeelements Thallium ist Paarbildung sehr wahrscheinlich. Es entstehen ein Elektron und ein Positron von je 511 keV, wovon die Zerfallsquanten (je 511 keV) den Detektor verlassen, so daß nur die verbleibende Energie registriert wird, die in Form eines Rückstoßes (und Ionisation) an den NaI-Kristall abgegeben wird. $2615 \text{ keV} - 2 \cdot 511 \text{ keV} = 1593 \text{ keV}$ ist also der sogenannte Double-Escape-Peak, bei dem beide Zerstrahlungsquanten den Kristall verlassen können. Verläßt nur ein Zerstrahlungsquant (511 keV) den Kristall, so erhält man nun $2615 \text{ keV} - 511 \text{ keV} = 2104 \text{ keV}$, also die Rückstoßenergie und die Ruheenergie eines der γ -Teilchen (Single-Escape-Peak).
9. Siehe 2.: Funktionsprinzip eines Szintillationszählers.