
Natürliche Radioaktivität

Von:
Fabian Kraus
Simon Fischer

Betreuung:
Dr. T. Hehl

10. Dezember 2021

Inhalt

1	Versuchsbeschreibung	1
2	Physikalische Grundlagen	1
2.1	Radioaktive Belastung des Menschen	1
2.2	Aktivität, Energiedosis und Äquivalentdosis	1
2.3	Nuklide, Isotope und Isobare	1
2.4	Zerfalls- und Strahlungsarten	2
2.4.1	α -Zerfall	2
2.4.2	β -Zerfall	2
2.5	Nachweis radioaktiver Strahlung	2
2.5.1	Geiger-Müller-Zählrohr	2
2.5.2	Halbleiterzähler	3
2.5.3	Szintillationsdetektor	3
2.6	Photomultiplier	3
2.7	Elektronenvolt	3
2.8	Halbwertsbreite	4
2.9	Aktivität beim frischen Präparat	4
2.10	Abschirmung	4
2.11	Krebserkrankung durch Radioaktivität	4
2.12	Thorium-Zerfall	4

3	Versuchsdurchführung	5
4	Ergebnisse & Auswertung	5
4.1	Leermessung	5
4.2	Kalibrierung	6
4.3	Armbanduhr	6
4.4	Aufgabe NR.VIII	7
4.5	Aufgabe NR.IX	8

1 Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch beschäftigen wir uns mit natürlicher Radioaktivität und bestimmen γ -Spektren verschiedener Stoffe.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Radioaktive Belastung des Menschen

Wir sind täglich radioaktiver Strahlung ausgesetzt, allein schon dadurch, dass wir das radioaktive Edelgas Radon einatmen. Über das Jahr hinweg beträgt zur Zeit die durchschnittliche Strahlenbelastung pro Kopf in Deutschland $4.3 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$, wobei ca. 56% natürlichen Ursprungs und die anderen 44% künstlichen Ursprungs sind.

Die größte Strahlenbelastung kommt dabei von der Medizin. Für Anwendungen wie Röntgen oder CT wird der Patient zur Diagnosezwecken ionisierender Strahlung ausgesetzt. Insgesamt kommt eine Belastung von $1.9 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$ zustande. Weitere künstliche Belastungsquellen sind: Fall-Out von Kernwafferversuchen $< 0.01 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$; Kernkraftwerke mit $< 0.01 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$ oder die Nachwirkungen des Reaktorunglücks von Tschernobyl $< 0.02 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$.

2.2 Aktivität, Energiedosis und Äquivalentdosis

Zunächst einmal hängt die SStärke eines radioaktiven Strahlers davon ab, wie häufig Zerfälle in dessen Kernen stattfindet. Ein Maß dafür ist die sogenannte Aktivität A , die Einheit ist Becquerel $1\text{Bq} \equiv \frac{1}{\text{s}}$. Da die Aktivität die Änderung der Menge N an Kernen angibt und selbst proportional zu N ist ergibt sich eine DGL mit exponentieller Lösung. Dabei beschreibt λ die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zerfall stattfindet pro Zeitintervall, und wird Zerfallskonstante genannt:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Die Zerfallswahrscheinlichkeit hängt außerdem zusammen mit der Halbwertszeit $T_{\frac{1}{2}}$, die angibt nach welcher Zeit die Hälfte einer Probe zerfallen ist:

$$N(T_{\frac{1}{2}}) = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}} = \frac{N_0}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

Nun gibt es verschiedene Dosiseinheiten, die den Einfluss der Strahlung auf den Organismus beschreiben. Da wäre zunächst die Energiedosis D_E mit der Einheit Gray 1Gy. Sie beschreibt das Verhältnis der deponierten Energie ΔE zur Masse Δm des absorbierenden Körpers. Die Ionendosis D_I mit Einheit $1 \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ gibt das Verhältnis der durch die ionisierende Strahlung entstandenen Ladung ΔQ zur Masse Δm an. Bei der Äquivalentdosis H mit Einheit Sievert 1Sv gibt es zusätzlich noch einen Bewertungsfaktor q , der die unterschiedliche Wirkung der Strahlung auf verschiedene Gewebearten berücksichtigt, $H = qD_E$.

2.3 Nuklide, Isotope und Isobare

Ein Nuklid ${}_Z^AX$ ist eine Art von Kern, wobei X das Elementsymbol, A die Massenzahl und Z die Ordnungszahl ist. Dabei entspricht außerdem A der Nukleonenzahl (Protonen und Neutronen) und Z der Protonenzahl im Kern. Nuklide desselben Elements (also mit gleicher Ordnungszahl Z) mit verschiedener Massenzahl (also verschiedener Neutronenzahl) nennt man Isotope. Nuklide mit der gleichen Massenzahl A aber verschiedener Ordnungszahl Z nennt man Isobare.

2.4 Zerfalls- und Strahlungsarten

Von den ca. 355 in der Natur vorkommenden Nukliden sind nach heutigem Kenntnisstand 255 stabil und 100 instabil. Dabei bedeutet stabil entweder, dass das Nuklid in keinen energieärmeren und damit stabileren Zustand übergehen könnte (z.B. Helium-4), oder dass es rein theoretisch schon zerfallen könnte, aber bisher noch kein Zerfall beobachtet werden konnte (z.B. Blei-208). Bei den instabilen Nukliden können verschiedene Arten von Zerfall auftreten, welche sich in α - und β -Zerfall unterteilen lassen. Es wird auch manchmal von γ -Zerfall geredet, jedoch liegt dabei gar kein Zerfall vor, der Kern wechselt von einem angeregten Energieniveau in ein niedrigeres und strahlt die Energiedifferenz als sogenannte γ -Strahlung ab. Da diese Strahlung hochenergetisch ist und ebenfalls ionisierend, wird dieser Vorgang auch als Radioaktivität bezeichnet, obwohl eigentlich kein Zerfallsprozess vorliegt.

2.4.1 α -Zerfall

Beim α -Zerfall tunnelt ein Heliumkern durch die Potentialbarriere aus dem effektiven Potential, welches durch Überlagerung des Coulomb-Potentials mit dem der starken Wechselwirkung gegeben ist. Da die Teilchen eine relativ "breite" Barriere durchtunneln müssen, ist die Wahrscheinlichkeit dafür recht gering und dementsprechend sind die Halbwertszeiten von α -Strahlern sehr hoch. Allgemein lässt sich der Vorgang schreiben als (X sei das Mutter- und Y das Tochternuklid):



Wobei die Energiedifferenz ΔE meist als γ -Strahlung emittiert wird.

2.4.2 β -Zerfall

Beim β -Zerfall wandelt sich entweder ein Neutron in ein Proton um (β^- -Zerfall) oder umgekehrt ein Proton in ein Neutron (β^+ -Zerfall). Bei beiden Prozessen ändert sich die Kernladungszahl Z , während die Massenzahl A gleich bleibt. Beim β^- -Zerfall wird ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino ausgesendet:



Für Mutternuklid X und Tochternuklid Y folgt:



Beim β^+ -Zerfall wird hingegen ein Positron und ein Elektron-Neutrino emittiert:



Für Mutternuklid X und Tochternuklid Y folgt:



Der β -Zerfall hat im Vergleich zum α -Zerfall sehr viel kürzere Halbwertszeiten, da die emittierten Teilchen als Leptonen nicht der starken Wechselwirkung unterliegen und somit keine Potentialbarriere durchtunneln müssen.

2.5 Nachweis radioaktiver Strahlung

2.5.1 Geiger-Müller-Zählrohr

Ein Geiger-Müller-Zählrohr besteht aus einem zylindrischen Metalrohr, in dessen Mitte ein dünner Draht verläuft. An Rohr und Draht wird eine Hochspannung angelegt (Gleichspannung), das Metalrohr ist die Kathode und der Draht die Anode. Im Rohr befindet sich ein Gas. Wenn ionisierende Strahlung auf das Gas trifft (z.B. γ -Strahlung, welche das Metall leicht durchdringt) werden freie Elektronen ausgelöst, welche zur Anode hin beschleunigt werden. Aufgrund der Hochspannung sind die Elektronen schnell energiereich genug, um auf ihrem Weg weitere Elektronen auszulösen. Es entsteht eine Elektronenlawine. Die Elektronen, die die Anode erreichen lösen einen Strompuls aus, dessen Stärke proportional zur Energie der einfallenden Strahlung ist.

2.5.2 Halbleiterzähler

Beim Halbleiter-Zähler wird an den p-n-Übergang einer Diode in Sperrrichtung Gleichspannung angelegt, sodass normalerweise kein Strom fließt. Fällt ionisierende Strahlung auf den Halbleiter, so kann ein Elektron-Loch-Paar freigesetzt werden, welches sich aufgrund der anliegenden Spannung trennt. Die so frei gewordenen Ladungsträger wandern nun zu den Elektroden und erzeugen einen messbaren Strompuls

2.5.3 Szintillationsdetektor

Ein Szintillator ist ein Stoff der nach Anregung durch energiereiche Photonen oder geladene Teilchen Licht im sichtbaren oder UV-Bereich emittiert. Der Name stammt aus dem Lateinischen (scintillare: ‚funkeln‘, ‚flackern‘). Die Intensität des ausgesendeten Lichts ist dabei proportional zur Energie der einfallenden Strahlung. Mittels eines Photomultipliers werden die zunächst eher schwachen Lichtblitze auf ein messbares Level verstärkt

2.6 Photomultiplier

Die Verstärkung im Photomultiplier geschieht mittels des Photoeffekts und Hochspannung. Fällt ein Photon auf die Kathode, kann es mit den Elektronen stoßen und diese, sofern es genügend Energie überträgt, aus dem Kathodenmaterial auslösen. Ausgelöste Elektronen werden durch die Hochspannung zur ersten Dynode beschleunigt, wo wiederum Elektronen ausgelöst werden, die zur nächsten Dynode beschleunigt werden usw. Insgesamt entsteht eine Lawine an ausgelösten Elektronen, die auf der Anode ein Signal auslösen. Der Schematische Aufbau ist in folgender Grafik aus der Versuchsanleitung zu sehen ([Abbildung 1](#)):

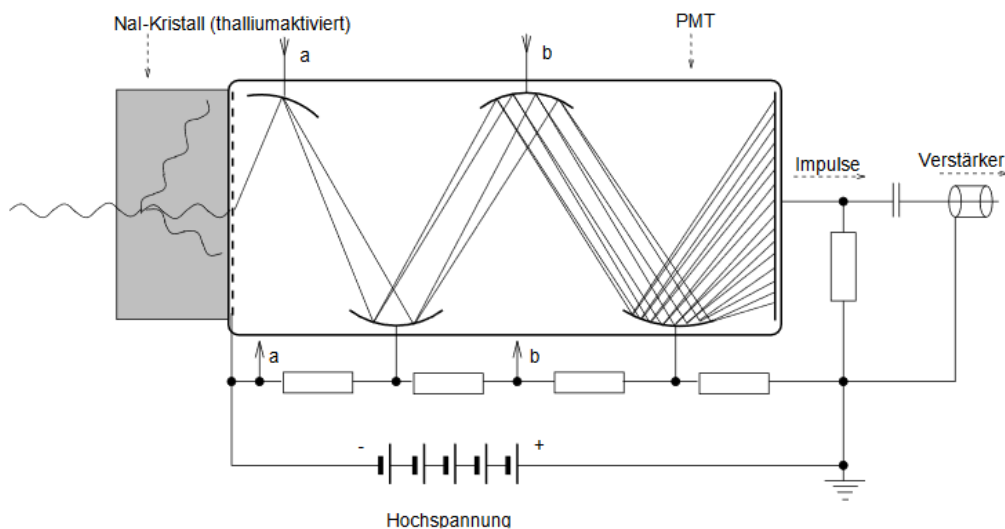


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Multipliers

2.7 Elektronenvolt

Ein eV ist die Energie eines Elektrons, welches mit einer Spannung von 1 V beschleunigt wurde und wird gerne bei Prozessen auf atomarer Ebene als Einheit genutzt. Die Umrechnung in die Einheit Joule und in SI-Einheiten lautet:

$$1 \text{ keV} = 1000 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,602 \cdot 10^{-16} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} \quad (8)$$

2.8 Halbwertsbreite

Die Energie der γ -Quanten ist normalverteilt, weswegen kein delta-Peak im Spektrum zu sehen ist. Sei eine Gauss-Verteilung $f(x) = Ce^{-\frac{(x-\langle x \rangle)^2}{2\sigma^2}}$ um den Mittelwert $\langle x \rangle$ mit der Standardabweichung σ gegeben. Die Halbwertsbreite ist der Abstand der x-Werte an denen die Verteilung den halben Wert des Maximums annimmt, also $\Delta x = x_2 - x_1$ mit $f(x_1) = f(x_2) = \frac{C}{2}$:

$$e^{-\frac{(x_{1/2}-\langle x \rangle)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{2} \quad (9)$$

$$\frac{(x_{1/2} - \langle x \rangle)^2}{2\sigma^2} = \ln 2$$

$$x_{1/2} = \langle x \rangle \pm \sqrt{2 \ln 2} \sigma$$

$$\Delta x = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma$$

2.9 Aktivität beim frischen Präparat

Bei einem frisch gereinigten Präparat steigt zunächst die Aktivität an, anstatt exponentiell abzufallen, was einen scheinbaren Widerspruch zur Theorie ergibt. Tatsächlich kommt die erhöhte Aktivität nicht vom Präparat selbst, sondern von den radioaktiven Tochterkernen, von denen zunächst so viele gebildet werden, dass die Gesamtaktivität des Systems leicht ansteigt

2.10 Abschirmung

Wie leicht bzw. schwierig sich ionisierende Strahlung abschirmen lässt hängt von der Art (massiv oder masselos) und Energie der Strahlung ab. Für α -Strahlung reicht bereits ein Blatt Papier, da die Helium-Kerne eine Masse haben und daher eine kurze Reichweite, und vor allem weil sie aufgrund ihrer Ladung elektrostatisch Wechselwirken. Bei der β -Strahlung ist die Masse schon geringer und dementsprechend die Reichweite etwas höher, sie lässt sich aber immer noch recht leicht abschirmen. Die γ -Strahlung hingegen ist masselos und ungeladen, und zusätzlich noch hochenergetisch. Sie ist daher am schwierigsten abzuschirmen, man benötigt dicken Stahlbeton oder Blei. Die kosmische Strahlung wird bei intakter Atmosphäre, also ohne Ozonloch, von dieser abgefangen. Durch Wechselwirkung in Form von Kollision, Absorption etc. mit z.B. Ozon wird der Strahlung Energie entzogen, wodurch sie für uns nicht mehr bedenklich ist

2.11 Krebserkrankung durch Radioaktivität

Geht man von einer Krebserkrankung pro 60Sv aus und einer jährlichen Belastung von 2.41 mSv aus natürlichen Quellen, so erkranken in einem Jahr ca. 3213 von $80 \cdot 10^6$ Einwohnern an Krebs. Laut [DKFZ](#) werden 500000 Neuerkrankungen für das Jahr 2020 prognostiziert. Damit wäre der Anteil, der durch natürliche Radioaktivität verursacht wird, bei 0,64%

2.12 Thorium-Zerfall

In der Zerfallskette von Thorium taucht auch Ra-224 auf, welches mit einer Intensität von 99,74% eine Linie bei 2615eV abstrahlt. Bei dieser hohen Energie können sich Elektron-Positron-Paare bilden, welche auf dem Weg zum Detektor jedoch wieder Rekombinieren können. Dabei werden zwei γ -Strahlen mit der Energie $E_\gamma = m_e c^2 \approx 511\text{keV}$ erzeugt (welche den Detektor nicht notwendigerweise erreichen müssen, sondern ihn auch verlassen können).

3 Versuchsdurchführung

Es werden drei Messungen durchgeführt:

- Eine Leermessung, um den Hintergrund zu erfassen.
- Eine Probe mit bekanntem Strahlungsprofil, um die Messung zu kalibrieren.
- Eine alte Armbanduhr mit Leuchtziffern.

Diese drei Messungen werden kombiniert, um herauszufinden, welche radioaktiven Stoffe in der Uhr enthalten sind.

4 Ergebnisse & Auswertung

4.1 Leermessung

Hier wurde 20 Minuten lang mit leerer Kammer gemessen. In allen nachfolgenden Messungen wurde diese Messung entsprechend der verschiedenen Messzeiten skaliert und subtrahiert. Die Leermessung selbst sah so aus:

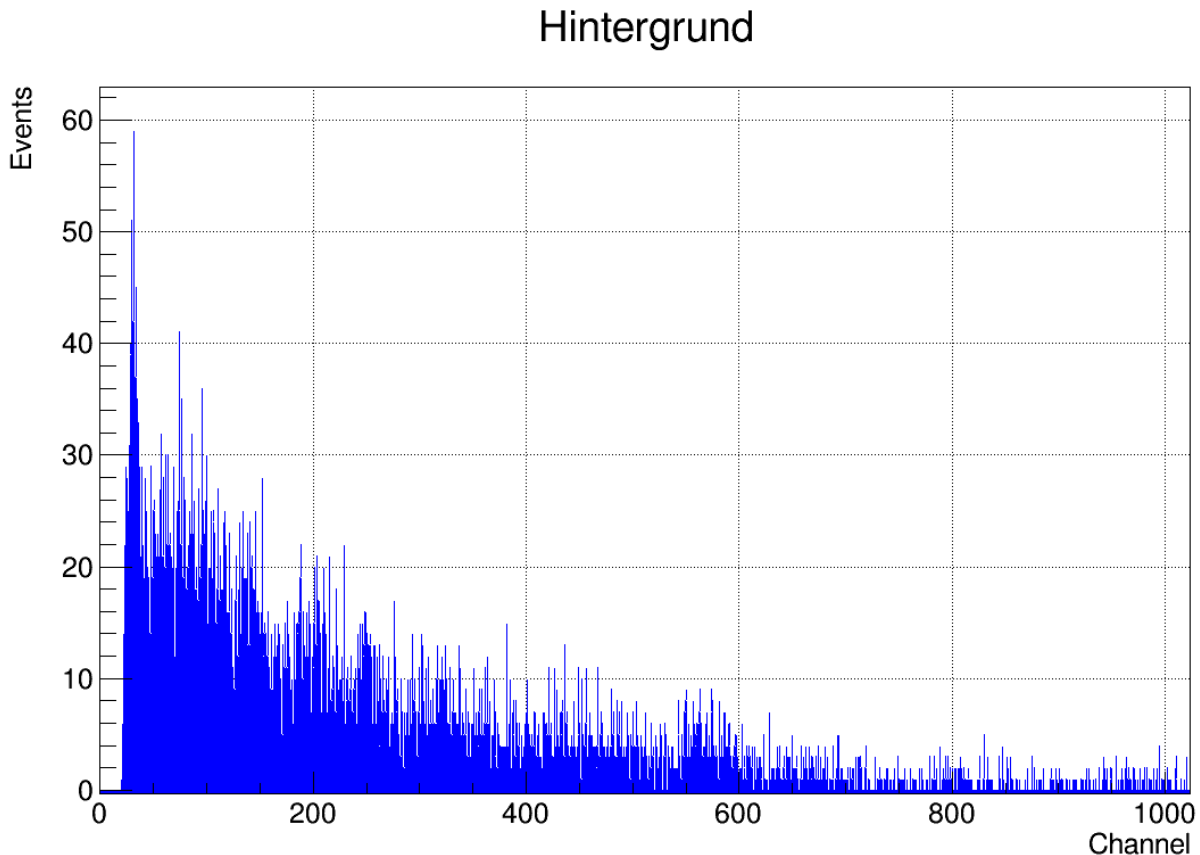


Abbildung 2: Histogramm der Leerlaufmessung

Man kann ganz links vermutlich die K_{α} -Linie bei 77 keV erkennen. Die Skalierung der horizontalen Achse muss nun im nächsten Abschnitt kalibriert werden.

4.2 Kalibrierung

Hier wurde ein Ring mit ^{22}Na zehn Minuten lang gemessen. Das Histogramm ist in Abb. 3 zu sehen:

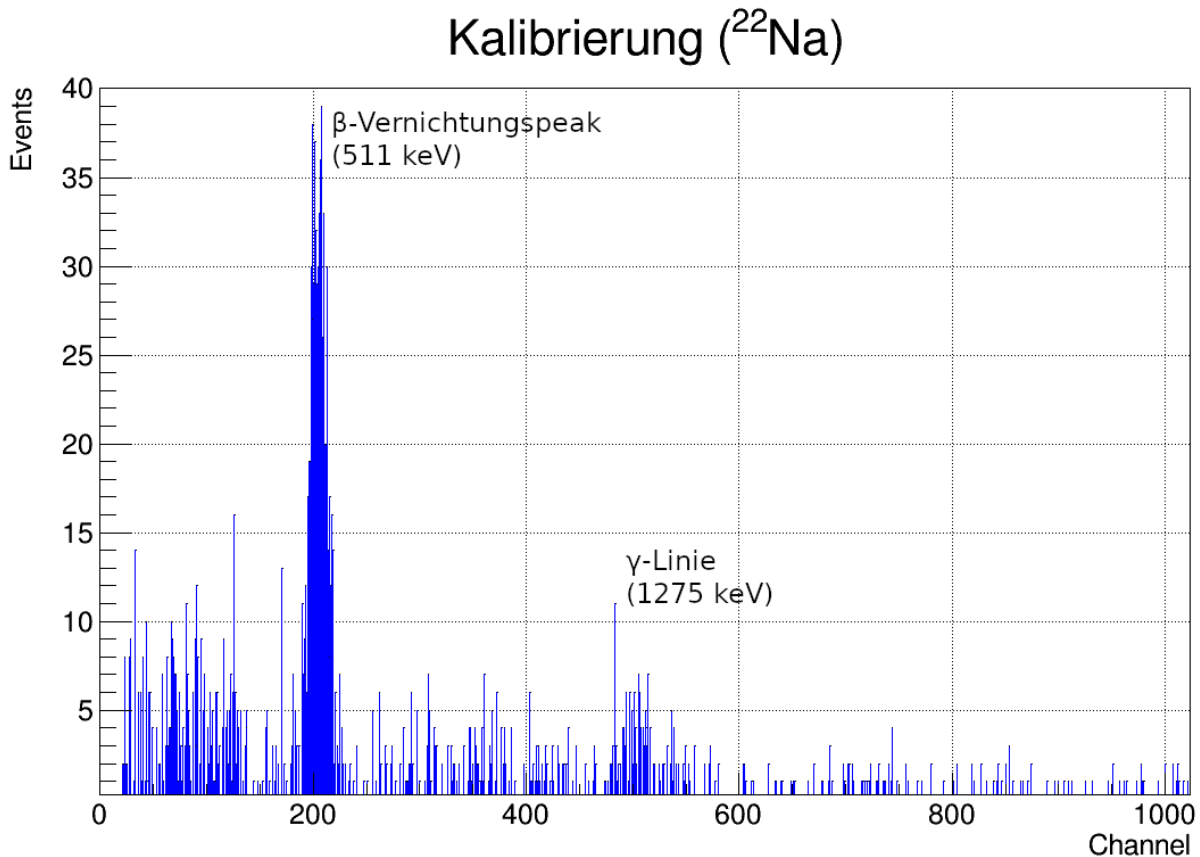


Abbildung 3: Histogramm der Kalibrierung mit den zwei bekannten Peaks markiert

Die γ -Linie ist nicht eindeutig erkennbar, hier hätte vielleicht etwas länger gemessen werden sollen. Die lineare Skalierung der Achse hat die Formel $E_\gamma(x) = E_0 + v \cdot x$, wobei x die Nummer des Kanals sei. Aus den beiden Peaks kann man die beiden Unbekannten E_0, v bestimmen:

$$\begin{aligned} E_\gamma(204.20) &\stackrel{!}{=} 511\text{keV} \\ E_\gamma(484.73) &\stackrel{!}{=} 1275\text{keV} \\ \Rightarrow E_0 &\approx -45.62\text{keV} \\ v &\approx 2.72\text{keV} \end{aligned}$$

Mit dieser Skalierung kann man nun unbekannte Proben auf ihr Energiespektrum untersuchen, was wir im nächsten Abschnitt machen werden.

4.3 Armbanduhr

Hier wurde eine Armbanduhr mit leuchtenden Zeigern 400 Sekunden lang gemessen. Das Histogramm ist in Abb. 4 zu sehen (mit der horizontalen Skalierung aus dem letztem Abschnitt):

Probe (Armbanduhr mit Leuchtziffern)

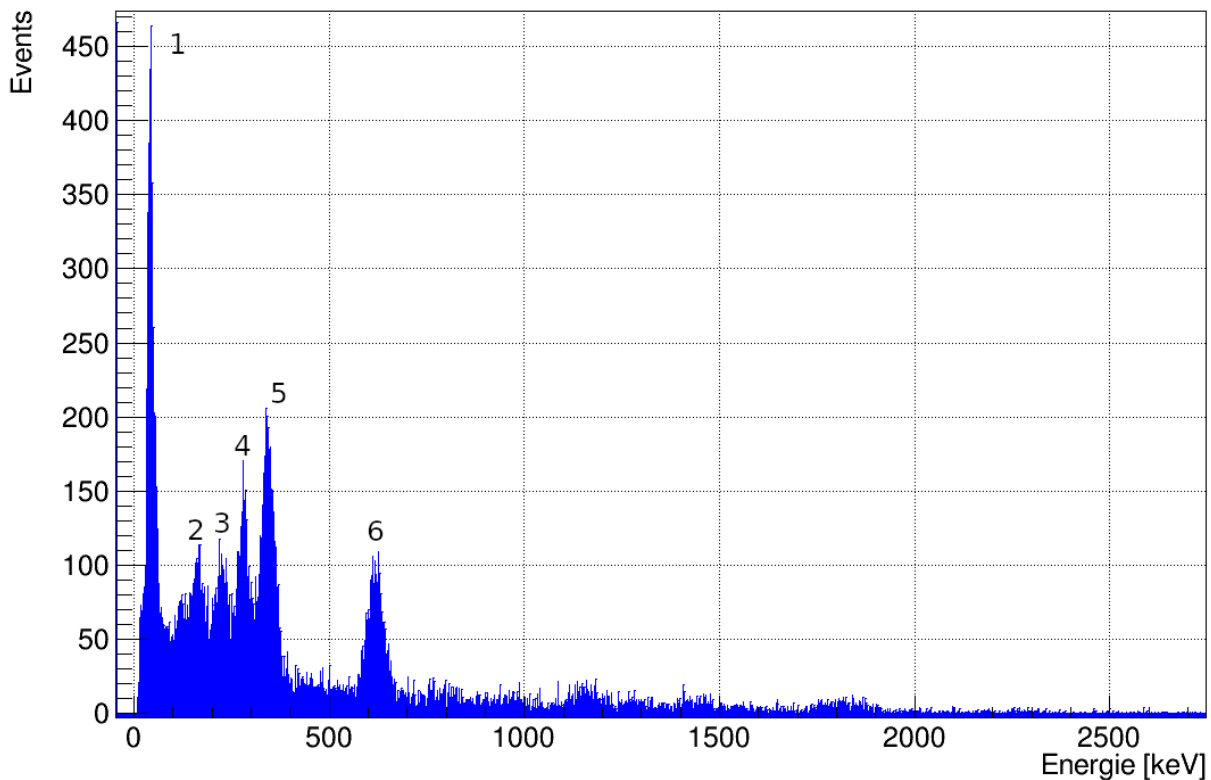


Abbildung 4: Histogramm der Armbanduhr

Man sieht hier im Vergleich zu den anderen Messungen eine sehr viel höhere Aktivität, obwohl kürzer gemessen wurde. Man kann mindestens sechs Peaks eindeutig erkennen. Diese sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Nr.	E [keV]
1	47.14
2	164.47
3	227.23
4	281.8
5	341.83
6	620.14

Tabelle 1: Peaks aus Abb. 4

4.4 Aufgabe NR.VIII

Die Kalibrierung bei einer anderen Gruppe erfolgte mit einer K_2CO_3 -Probe, hierbei war ein Vollabsorptionspeak bei 1460.1 keV sichtbar. Des weiteren ist der β^+ -Vernichtungspeak auch erkennbar, jedoch leicht verschoben.

Gem. Anleitung bestand die Kalium-Probe aus 192 g. Bei einer molaren Masse von 138 g mol^{-1} entspricht dies 1.391 mol. Dies entspricht dann 8.378×10^{23} Teilchen - und die zweifache Anzahl an Kalium-Atomen. Unter Verwendung des Anteilfaktors von 1.17×10^{-4} Kalium erhalten wir 1.961×10^{20} Gesamtzerfälle. Bei einer Halbwertszeit von 1.277×10^9 Jahren entspricht dies dann einer Zerfallsrate von 3374 Bq.

In der Praxis wurden 18061 Zerfälle in einer Zeit von 300 Sekunden gemessen. Dies entspricht einer Zerfallsrate von 60.2 Bq, also ein Anteil von grob $\frac{1}{60}$. Da unser Detektor nur in eine Raumdimension

misst und nicht unbedingt alle Zerfälle in dieser Richtung erfasst, müssen wir mindestens den freien Multiplikator auf 6 stellen. Des weiteren kommt noch hinzu, dass Kalium nur zu 10.72% in Form von γ -Strahlung zerfällt. Daher müssen wir unseren Wert korrigieren um folgenden Faktor:

$$A = 60.2 \text{ Bq} \cdot 6 \cdot \frac{100\%}{10.72\%} = 3369 \text{ Bq}$$

Eine Abweichung von knapp 0,148% lässt sich dadurch erklären, dass nicht alle ausgesandten γ -Quanten den Detektor erreichen. Was eher nebensächlich ist, ist die Abschirmung durch die Luft, diese ist auf eine Strecke von ca. 0.1 m zu vernachlässigen.

4.5 Aufgabe NR.IX

Zur Abschätzung der Strahlendosis auf ein Jahr lässt sich mithilfe der Langzeitmessung der Praktikumsseite, welche über 2 Stunden aufgenommen wurde die Energie berechnen:

$$W = \sum_{i=0}^{1023} N_i W_i = 7.27 \times 10^{11} \text{ eV}$$

Wird dies auf das gesamte Jahr hochgerechnet, so ergibt sich eine Gesamtenergie von $5.10 \times 10^{-4} \text{ J}$. Der NaI-Kristall hat eine Masse von 1.286 kg. Es folgt daraus eine Äquivalentdosis von:

$$H = \frac{5.10 \times 10^{-4} \text{ J}}{1.286 \text{ kg}} = 3.968 \times 10^{-4} \text{ Sv/yr}$$

Für einen durchschnittlichen Erwachsenen mit $m = 75 \text{ kg}$ ergibt sich somit:

$$W_{Mensch} = \frac{5.10 \times 10^{-4} \text{ J}}{1.286 \text{ kg}} 75 \text{ kg} = 2.976 \times 10^{-2} \text{ J/yr}$$

Verglichen mit der Armbanduhr ergibt sich eine Gesamtenergieaufnahme für einen 75 von $W_{Mensch} = 1.23 \times 10^{-4} \text{ J/yr}$. Rechnet man dies in die Äquivalentdosis um, so erhält man:

$$H_{Mensch} = \frac{W_{uhr}}{m} = 1.63 \times 10^{-6} \text{ Sv/yr}$$

Die Uhr erzeugt also eine Strahlenbelastung, die zwei Größenordnungen über dem Hintergrund ist. Die Unterscheidung im Strahlenschutz zwischen Ganzkörperdosis und Gewebedosis ist notwendig, da unterschiedliche Organe unterschiedlich stark geschädigt werden von ionisierender Strahlung. So kann eine punktuelle Strahlenbelastung (z.B. zu medizinischen Zwecken) hoch sein, ist aber nicht tödlich.