

# Ausarbeitung zu "Radioaktivität"

Anfängerpraktikum Teil 3  
Technische Universität München

Clara Donat, Matthias Quintern  
Kurs Block A, Gruppe 5, Team 9

15. März 2021

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Zerfallsgesetz und Aktivität . . . . .	2
2.2	Wechselwirkung mit Materie . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Experimentelles Vorgehen</b>	<b>3</b>
4.1	Kalibrierung . . . . .	3
4.2	Messung der Untergrundstrahlung . . . . .	3
4.3	Spektrumsaufnahme der Präparate . . . . .	3
4.4	Messung der Höhenstrahlung . . . . .	4
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>4</b>
5.1	Kalibrierspektren . . . . .	4
5.2	Messung der Untergrundstrahlung . . . . .	5
5.3	Messung der Kaliumcarbonat-Probe . . . . .	5
5.4	Lebenslange Strahlenbelastung neben Caesium-137 . . . . .	6
5.5	Tschernobylprobe . . . . .	7
5.6	Hypothetischer Verzehr einer Probe . . . . .	7
5.7	Uranoxid und Thoriummetall . . . . .	7
5.8	Wecker mit Leuchtzeigern . . . . .	7
5.9	Strahlenbelastung durch Höhenstrahlung . . . . .	8
5.10	Erklärung der starken Absorption bei 34 keV . . . . .	9
<b>6</b>	<b>Fragen</b>	<b>10</b>
6.1	Definition von Elektronenvolt . . . . .	10
6.2	Breite der Peaks . . . . .	11
6.3	Linie bei 77 keV . . . . .	11
6.4	Unsicherheit der Zählraten . . . . .	11
6.5	Aktivitätsverlauf . . . . .	11
6.6	Abschirmung von Strahlung . . . . .	11
6.7	Thorium-Linien . . . . .	11
6.8	NaI-Kristall . . . . .	11

<b>7 Anhang</b>	<b>12</b>
7.1 Energieunsicherheiten der Peaks . . . . .	12
7.2 Charakteristische Energien gewisser Quellen . . . . .	12

<b>8 Literaturverzeichnis</b>	<b>12</b>
-------------------------------	-----------

## 1 Einleitung

In diesem Versuch werden verschiedene radioaktive Präparate untersucht. Dabei wird radioaktive Strahlung in Abhängigkeit von ihrer Energie gemessen. Aus diesen Spektren lässt sich dann ermitteln, welches radioaktive Element in einer Probe enthalten ist und wie aktiv diese ist.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Zerfallsgesetz und Aktivität

Über den Zerfall eines Atomkerns lassen sich nur statistische Aussagen treffen. Wann genau ein Kern zerfällt, ist zufällig und lässt sich nicht vorhersagen. Die *Halbwertszeit*  $T_{1/2}$  eines Stoffes gibt an, nach welcher Zeit die Hälfte des Stoffes zerfallen ist:

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

dabei ist  $\lambda$  die Zerfallskonstante des Stoffes. Mit der Teilchenzahl  $N_0$  des Stoffes zum Zeitpunkt  $t = 0$  gilt für die Teilchenzahl zur Zeit  $t$  mit dem *Zerfallsgesetz* [6]:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t). \quad (2)$$

Die *Aktivität*  $A$  [ $A = 1 \text{ Bq} = 1 \frac{1}{\text{s}}$ ] gibt die Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit an. Sie lässt sich durch Ableiten des Zerfallsgesetzes nach der Zeit bestimmen:

$$A(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot \exp(-\lambda t) = A_0 \cdot \exp(-\lambda t). \quad (3)$$

Dabei bezeichnet  $A_0$  die Aktivität zum Zeitpunkt  $t = 0$ .

### 2.2 Wechselwirkung mit Materie

Radioaktive Strahlung kann auf verschiedene Weise mit der Materie wechselwirken. Beispielsweise kann die Materie bei  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung durch die Coulomb-Wechselwirkung und bei  $\gamma$ -Strahlung durch den Photo- oder den Comptoneffekt ionisiert werden.

Bei  $\gamma$ -Quanten kann es zudem zur *Paarbildung* kommen, wenn deren Energie größer als die Ruheenergie eines Positrons und ein eines Elektrons ist ( $E_\gamma > 2 \cdot m_e c^2 = 1022 \text{ keV}$  [6]). Ist zusätzlich ein Atomkern in der Nähe, der den überschüssigen **Rückstoimpuls** aufnimmt, kann ein Elektron-Positron-Paar aus dem  $\gamma$ -Quant erzeugt werden.

Die durch die Effekte entstanden freien Elektronen haben Energien von bis zu mehreren MeV und ionisieren daher weitere Teilchen.

Wird ein Atom durch radioaktive Strahlung angeregt oder ein Elektron aus einer inneren Schale herausgeschlagen, werden die Energieniveaus von den Elektronen der äußeren Schalen wieder neu besetzt. Dabei wird die für den Stoff charakteristische Röntgenstrahlung emittiert. Aufgrund der emittierten Wellenlänge(n) lassen sich Rückschlüsse auf das Material ziehen.

Tabelle 3 zeigt die Halbwertszeit und charakteristische Energien von emittierten  $\gamma$ -Quanten für einige Isotope.

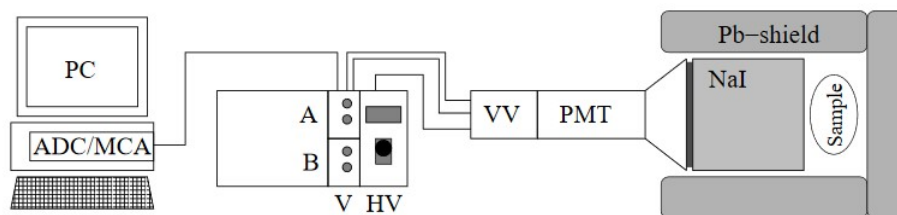


Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau mit (von rechts nach links): einer Probe (Sample), einer Bleiabschirmung (Pb-shield), einem NaI-Zähler zur Detektion von radioaktiven Zerfällen, einer Photo-Multiplier-Tube (PMT), einem Vorverstärker (VV) und einem Doppelverstärker (V), angelegter Hochspannung (HV), einem Analog-Digital-Wandler (ADC), einem Vielkanalanalysator (MCA) und einem angeschlossenen Computer (PC)

### 3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Die Proben werden vor einem thalliumaktivierten NaI-Kristall platziert. In diesem wird die Energie der einfallenden Teilchen auf die Kristallatome übertragen und als Lichtblitze ausgestrahlt. Die Lichtblitze treffen dann auf einen Photomultiplier, in dem durch den Photoeffekt freie Elektronen erzeugt werden. Durch Beschleunigung der Elektronen mit einer Hochspannung entstehen weitere freie Elektronen, bis schließlich eine Elektronenlawine auf die Anode trifft und ein Signal erzeugt. Das Signal wird dann verstärkt und von einem Vielkanalanalysator auf 1024 verschiedene Kanäle zugeordnet.

Die Daten werden mit „Cassy-Lab 2“ aufgenommen, wobei man für jeden Kanal die Anzahl der registrierten Ereignisse erhält.

## 4 Experimentelles Vorgehen

### 4.1 Kalibrierung

Um jedem Kanal eine Energie zuzuordnen zu können, werden Kalibrierungsspektren aufgenommen. Dazu werden Na-22, Co-60 und Cs-137 benutzt, da deren charakteristische Energien bekannt sind (siehe Tabelle 3). Der Kanal, bei dem ein Peak sichtbar ist, registriert dann genau die  $\gamma$ -Quanten mit der jeweiligen charakteristischen Energie.

Es wird angenommen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Kanalnummer und dazugehöriger Energie besteht. Eine Gleichung zur Umrechnung der Kanalnummer in Energie erhält man aus einem linearen Fit der charakteristischen Energien der Präparate über die Kanalnummern, an denen der jeweilige Peak auftritt.

Für jedes der drei Präparate wird das Spektrum jeweils über 60 Sekunden aufgenommen.

### 4.2 Messung der Untergrundstrahlung

Die Untergrundstrahlung wird einmal mit und einmal ohne Bleiabschirmung des Detektors gemessen. Die Messdauer beträgt jeweils 10 Minuten.

### 4.3 Spektrumsaufnahme der Präparate

Anschließend wird das Spektrum einer Kaliumcarbonatprobe ( $K_2CO_3$ ) und einer Tschernobylprobe aus dem Jahr 1986 jeweils 10 Minuten lang aufgenommen. Zudem misst man die Zerfälle bei einem Uranoxid- und Thoriummetallpräparat jeweils 5 Minuten lang sowie diejenigen eines Weckers mit Leuchtzeigern für 15 Minuten. Bei all diesen Messungen wird die Bleiabschirmung verwendet.

## 4.4 Messung der Höhenstrahlung

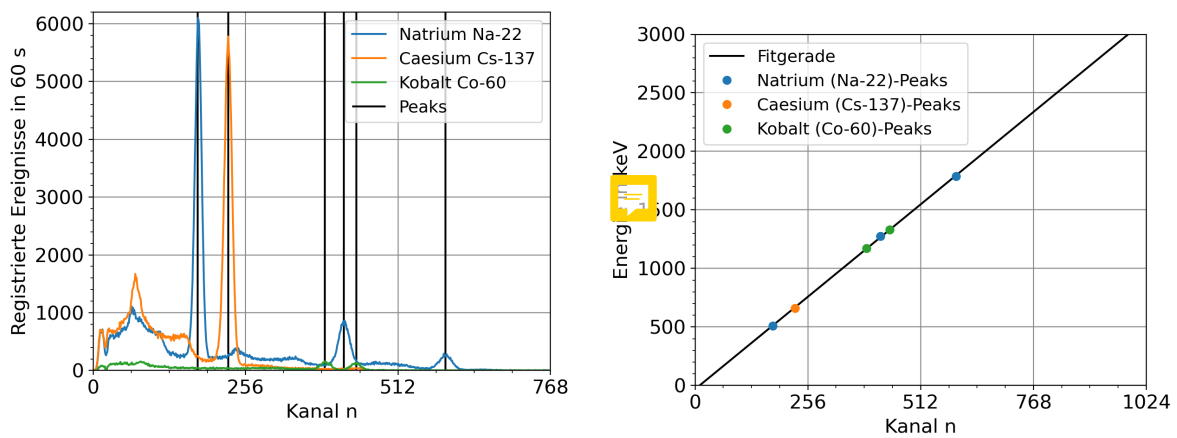
Für diesen Versuchsteil wird die Einstellung des Geräts so verändert, dass Energien bis zu 50 MeV gemessen werden können. Damit lassen sich Teilchen im Bereich von 1 GeV detektieren, da diese im Detektor einen Energielverlust von ca 40 MeV erleiden.

Nun muss die Energie-Eichung erneut vorgenommen werden, wobei sie dieses Mal nur mit Co-60 durchgeführt wird. Anschließend wird die Höhenstrahlung über zwei Stunden gemessen.

Aufgrund der Covid-19 Beschränkungen wurde dieser Versuchsteil nicht durchgeführt, stattdessen wurden Daten zur Auswertung auf Moodle bereitgestellt [9].

## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Kalibrierspektren



(a) Über 60 Sekunden aufgenommene Spektren (Anzahl der registrierten Ereignisse in Abhängigkeit von der Kanalnummer  $n$ ) von Na-22, Co-60 und Cs-137. Die vertikalen Linien markieren die Position der charakteristischen Energien.

(b) Die Kanalnummern der charakteristischen Peaks mit den dazugehörigen Energien und linearer Fitgerade:  $E(n) = a \cdot n + b$  mit  $a = (3,084 \pm 0,020)$  keV und  $b = (31,44 \pm 8,03)$  keV.

Abbildung 2a zeigt die aufgenommenen Spektren von Na-22, Co-60 und Cs-137. Dabei ist die Anzahl der registrierten Ereignisse in Abhängigkeit von der Kanalnummer  $n$  aufgetragen. Die vertikalen Linien markieren die Positionen der charakteristischen Energien. Die dazu passenden Energiewerte wurden dann aus Tabelle 3 entnommen. Auffällig ist, dass man bei Natrium drei Peaks beobachten kann, obwohl in diesem Energiebereich nur zwei sichtbar sein sollten.

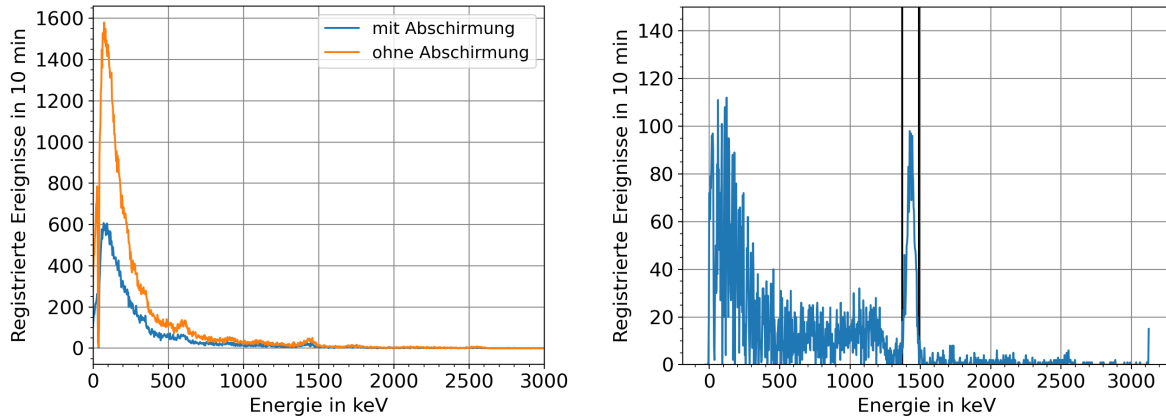
Dies liegt daran, dass ein Quant mit der Energie des ersten Peaks  $E_1 = 511$  keV und eines mit der Energie des zweiten  $E_2 = 1275$  keV nahezu gleichzeitig registriert wurden. Der Detektor kann diese dann nicht mehr unterscheiden und zeigt demnach ein Quant mit der Summe der beiden Energien an. Der dritte Peak entspricht demnach der Energie  $E_3 = E_1 + E_2 = 1787$  keV.

Die sechs gefundenen charakteristischen Energien sind in Abbildung 2b über die entsprechende Kanalnummer  $n$  aufgetragen. Zusätzlich ist eine lineare Fitgerade eingezeichnet. Über die Geradengleichung werden bei der weiteren Versuchsauswertung die Kanalnummern in Energien umgerechnet:

$$E(n) = a \cdot n + b \quad (4)$$

mit Fitparametern  $a = (3,084 \pm 0,020)$  keV und  $b = (31,44 \pm 8,03)$  keV. Man sieht in Abbildung 2b, dass keiner der Punkte weit von der Fitgerade abweicht; die Annahme eines linearen Zusammenhangs scheint daher gerechtfertigt.

## 5.2 Messung der Untergrundstrahlung



(a) Über 10 Minuten aufgenommene Spektren der Hintergrundstrahlung mit und ohne Bleiabschirmung (b) Gemessenes Spektrum der Kaliumcarbonat-Probe mit bereits abgezogener Hintergrundstrahlung

Abbildung 3a zeigt die Spektren der Untergrundstrahlung mit und ohne Bleiabschirmung. Wie erwartet wurde durch das Blei ein großer Teil der Strahlung abgeschirmt, sodass weniger Zerfälle registriert wurden.

Es lassen sich drei Peaks beobachten, ein sehr großer bei  $E_1 = 80 \text{ keV}$  und zwei kleine bei  $E_2 = 600 \text{ keV}$  und  $E_3 = 1440 \text{ keV}$ .  $E_1$  passt zu Th-228 ( $E_{\text{Th-228}} = 840 \text{ keV}$ ),  $E_2$  zu Bi-214 ( $E_{\text{Bi-214}} = 609 \text{ keV}$ ) oder Rn-223 ( $E_{\text{Rn-223}} = 593 \text{ keV}$ ),  $E_3$  passt zu K-40 ( $E_{\text{K-40}} = 1,461 \text{ keV}$ ) [6].

Bei der weiteren Versuchsauswertung wird, wenn nicht anders angegeben, nur noch mit der korrigierten detektierten Ereigniszahl gerechnet. Das bedeutet, dass das Spektrum der Untergrundstrahlung von den anderen Spektren abgezogen wird. Negative Werte werden zudem durch Null ersetzt.

Aus dem Spektrum, welches ohne Bleiabschirmung aufgenommen wurde, lässt sich die jährliche Belastung durch diese niederenergetische Strahlung abschätzen. Dazu wird zunächst die Masse des zylinderförmigen NaI-Kristalls berechnet. Dieser hat einen Durchmesser von  $d = 3 \text{ in}$ , eine Länge von  $l = 3 \text{ in}$  und eine Dichte von  $\rho = 3,7 \text{ g/cm}^3$ . Die Masse berechnet sich zu  $m = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot \rho}{4} = 1,29 \text{ kg}$ .

Man nimmt nun an, dass die  $\gamma$ -Quanten eine mittlere Energie von  $\bar{E} = 100 \text{ keV}$  besitzen. Die Strahlenbelastung berechnet sich dann mit

$$D = \frac{N_{\text{ges,a}} \cdot \bar{E}}{m}, \quad (5)$$

wobei  $N_{\text{ges,a}}$  die Summe aller registrierten Teilchen hochgerechnet auf ein ganzes Jahr ist. Numerisch erhält man den Wert  $D = 0,072 \text{ mGy}$ . Dies liegt etwa in der Größenordnung der Strahlenbelastung, die man bei einer Röntgenaufnahme eines Arms oder Beins erhält. Diese beträgt etwa  $0,01\text{-}0,1 \text{ mSv}$  [6].

## 5.3 Messung der Kaliumcarbonat-Probe

Zuerst wird die Anzahl der (radioaktiven) K-Atome in der verwendeten Kaliumcarbonat-Probe berechnet. Dazu benötigt man die Massen von Kalium, Kohlenstoff und Sauerstoff. Diese sind  $m_K = 39 \text{ amu}$ ,  $m_C = 12 \text{ amu}$  und  $m_O = 16 \text{ amu}$  [6]. Mit der Masse der Probe  $m = 100,24 \text{ g}$  lässt sich die Anzahl der Kalium-Atome berechnen mit:

$$N_K = \frac{m}{2 \cdot 39 \text{ amu} + 1 \cdot 12 \text{ amu} + 3 \cdot 16 \text{ amu}} \quad (6)$$

Man erhält  $N_K = 8,685 \cdot 10^{23}$ . Allerdings sind nur  $0,01\%$  der Atome radioaktiv, deren Anzahl beträgt also  $N_{\text{K,rad}} = 8,685 \cdot 10^{19}$ .

Damit kann man nun die Anzahl der Kaliumatome berechnen, die pro Sekunde zerfallen. Dazu wird zuerst

die Zerfallskonstante  $\lambda$  mit Gleichung (1) und der Halbwertszeit  $T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9$  a [6] ermittelt. Man erhält  $\lambda = 5,42 \cdot 10^{-10} \frac{1}{\text{a}}$ . Einsetzen von  $\lambda$ ,  $N_{\text{K,rad}}$  und  $t = 1$  s in Gleichung (3) ergibt  $A_{\text{K-40}} = 1490$  Bq.

Bei der Kaliumcarbonat-Probe erwartet man einen Peak bei der  $E = 1461$  keV (siehe Tabelle 3), da Kalium der einzig radioaktive Bestandteil des Moleküls ist.

Abbildung 3b zeigt das aufgenommene Spektrum der Kaliumcarbonat-Probe, die Daten wurden schon um die Hintergrundstrahlung korrigiert. Zusätzlich sind die Grenzen des Peaks eingezeichnet. Tatsächlich beobachtet man beobachtet einen Peak bei ca.  $E_K = 1440$  keV, was ungefähr  $E_K = 1461$  keV aus Tabelle 3 entspricht. Der Peak bei ca. 80 keV wird in Teil 6.3 näher erklärt.

Die Aktivität des Kaliums lässt sich aus dem Spektrum ermitteln. Dazu wird die Anzahl der registrierten Ereignisse in dem Peak aufsummiert, um die Anzahl der Zerfälle über 10 Minuten zu erhalten. Die Zahl der nachgewiesenen Zerfälle beträgt  $N_{10 \text{ min}} = 1907 \pm 55$ . Umrechnen für  $t = 1$  s liefert  $A_{\text{K-40, exp}} = (3,178 \pm 0,092)$  Bq.

Man erkennt einen deutlichen Unterschied von ca. 500% zwischen der experimentell bestimmten und der mit der Halbwertszeit bestimmten Aktivität von  $A_{\text{K-40}} = 1490$  Bq. Dafür gibt es mehrere Gründe: Der berechnete Wert beinhaltet alle Zerfälle; also nicht nur jene, die  $\gamma$ -Quanten mit 1461 keV ausstrahlen. Deren Anteil beträgt ca. 11% der Zerfälle [6] und diese sind die einzigen, die beim Versuch gemessen wurden. Desweiteren nimmt der Detektor nur einen bestimmten Raumwinkel ein, weswegen nicht alle Zerfälle registriert werden.

Nimmt man näherungsweise an, dass der Detektor Strahlung in einem Raumwinkel von  $\Theta = \frac{\pi}{4 \cdot \pi}$  registriert und berücksichtigt, dass nur 11% der Zerfälle gemessen werden können, lässt sich der berechnete Wert an die Versuchsbedingungen anpassen. Man erhält  $A_{\text{K-40, kor}} = 10$  Bq, was schon deutlich näher am experimentell bestimmten Wert liegt.

## 5.4 Lebenslange Strahlenbelastung neben Caesium-137

Um die Gefährlichkeit der stärksten im Versuch verwendeten Strahlungsquelle Caesium-137 abzuschätzen, führt man ein Gedankenexperiment durch. Dabei wird die zusätzliche Strahlenbelastung abgeschätzt, der man ausgesetzt wäre, wenn man sich ab jetzt ständig einen Meter ( $r=1$  m) entfernt von diesem radioaktiven Stoff aufhalten würde.

Dazu wird zunächst mithilfe von Gleichung (3) die Aktivität der Quelle zum jetzigen Zeitpunkt ermittelt.  $A_0 = 333$  kBq ist hierbei die bekannte Aktivität der Quelle im Jahr 1992 und  $t = 29$  a die Zeitdifferenz zwischen 1992 und heute. Die Zerfallskonstante ergibt sich mit dem Literaturwert für die Halbwertszeit  $T_{1/2} = 11018,3$  d [10] und Gleichung (1) zu  $\lambda = 7,28 \cdot 10^{-10}$ . Insgesamt erhält man  $A_{\text{heute}} = 171$  kBq.

Nun wird der Raumwinkel des menschlichen Körpers in einem Meter Entfernung von der Probe abgeschätzt. Mit einer durchschnittlichen menschlichen Höhe  $h = 1,7$  m und Breite  $b = 0,4$  m kann man den Radius  $r_M$ , der zu einem Kreis genäherten Oberfläche des Menschen, zu:

$$r_M = \sqrt{\frac{b \cdot h}{\pi}} \approx 0,47 \text{ m} \quad (7)$$

bestimmen. Der Raumwinkel  $\Omega = \frac{4\pi r_M^2}{r^2} = 2,72$  nimmt ca.  $\Omega_{\%} = \frac{\Omega}{4\pi r^2} = 0,22$  also 22% der gesamten Kugeloberfläche mit Radius  $r$  ein.

Für die Bestimmung der aufgenommenen Energie pro Jahr stellt man Gleichung (3) nach  $N_0$  um und verwendet  $t = 0$  sowie  $A(t) = A_{\text{heute}}$ . Anschließend wird  $N_0$  in Gleichung (2) eingesetzt und mit  $t = 1$  a die Anzahl der nach einem Jahr noch nicht zerfallenen Kerne  $N_{1a}$  bestimmt.

Die in diesem Jahr aufgenommene Energie  $E_{1a}$  erhält man zu  $E_{1a} = \Omega_{\%} \cdot N_{1a} \cdot \gamma_{\text{Cs}} \cdot e = 5,27$  J, wobei  $e$  die Elementarladung ist und  $\gamma_{\text{Cs}} = 662$  keV aus Tabelle 3 entnommen wurde.

Mit einem Körpergewicht  $m = 70$  kg ergibt sich eine Strahlenbelastung von  $\frac{E_{1a}}{m} = 0,075$  Sv im ersten Jahr. Diese ist etwas größer als die durchschnittliche jährliche Höhenstrahlenbelastung von ca. 45 mS/a auf 12 km Höhe [6]. Die Strahlung des Caesiums würde sich in den nachfolgenden Jahren aber noch verringern, da dann immer weniger Kerne noch nicht zerfallen sind.

## 5.5 Tschernobylprobe

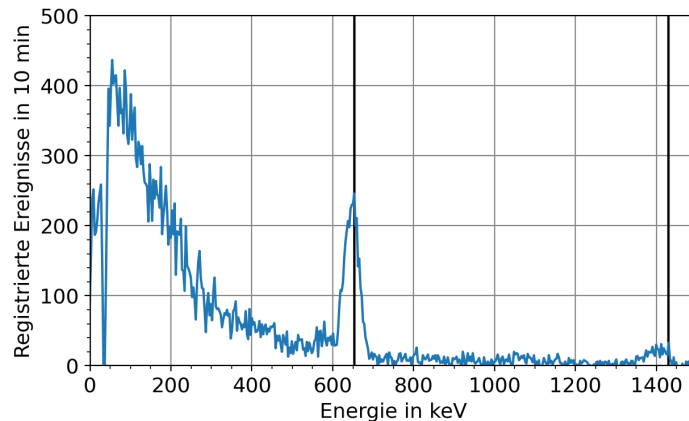


Abbildung 4: Aufgenommenes Energiespektrum der Tschernobyl-Probe

Bei der Messung der Tschernobyl-Probe wurde das in Abbildung 4 gezeigte Spektrum aufgenommen. Die Lage der schwarz eingezeichneten Peaks wurde bestimmt, indem zuerst die Kanalnummern der Maxima mit Unsicherheit zu  $K_1 = 222 \pm 3$  und  $K_2 = 474 \pm 20$  abgeschätzt wurden. Setzt man diese Werte in die Funktionsgleichung (4) ein, erhält man  $E_1 = 653 \pm 13$  keV und  $E_2 = 1430 \pm 63$  keV. Im Folgenden geht man immer auf diese Art bei der Bestimmung der Peaks vor. Die Fehlerrechnung wird im Anhang besprochen.

Die gefundenen Energiewerte stimmen innerhalb ihrer Unsicherheiten mit  $\gamma$ -Energien von Cs-137 und K-40 überein (vgl. Tabelle 3). Dabei stammt das Cäsium aus der Tschernobyl-Katastrophe [11], während Kalium von Natur aus in Molke enthalten ist [4].

## 5.6 Hypothetischer Verzehr einer Probe

Um herauszufinden, wie gefährlich es wäre, die untersuchte radioaktiv kontaminierte Molke zu essen, trifft man einige vereinfachende Annahmen. Die Molke soll nach dem Verzehr noch eine Woche im Körper verbleiben, dort gleichmäßig verteilt sein und die  $\gamma$ -Strahlung soll vollständig absorbiert werden.

Multipliziert man nun für die ermittelten Peak-Intervalle alle Energien mit der jeweiligen Zählrate, ergibt sich hochgerechnet auf eine Woche eine Gesamtenergie von  $E_{\text{ges}} = 0,17$   $\mu$ J. Teilt man diese anschließend durch ein durchschnittliches Körpergewicht von  $m = 80$  kg, ergibt sich die Strahlenbelastung zu ca. 2,1 nSv pro Woche. Dieser Wert liegt beispielsweise deutlich unter der Strahlenbelastung von typischen Röntgenaufnahmen [6]; der Verzehr dieser Probe wäre also relativ ungefährlich.

## 5.7 Uranoxid und Thoriummetall

Die Zerfallsraten der Uranoxid- und Thoriummetallproben sind in Abbildung 5a und 5b dargestellt, wobei die Plots bei 1100 keV und 2700 keV abgeschnitten wurden, weil bei größeren Energien keine Peaks mehr auftreten. Die Energien und Nuklide mit ähnlichen  $\gamma$ -Emissionen sind in Tabelle 1 zusammengefasst, wobei der Index „U“ für Uranoxid und „Th“ für Thoriummetall steht. Die Spalten mit den Nukliden wurden aus Tabelle 3 übernommen. Insgesamt lassen sich den Maxima relativ eindeutig bestimmte Nuklide aus der jeweiligen Zerfallsreihe zuordnen. Die Ursache der Th-Linie bei 77 keV wird in Abschnitt 6.3 näher erläutert.

## 5.8 Wecker mit Leuchtzeigern

Der in Abbildung 6a dargestellte Plot zeigt das aufgenommene Spektrum eines Weckers mit Leuchtzeigern. Die Positionen der schwarz markierten Maxima  $E_W$  sind zusammen mit den zugehörigen radioaktiven

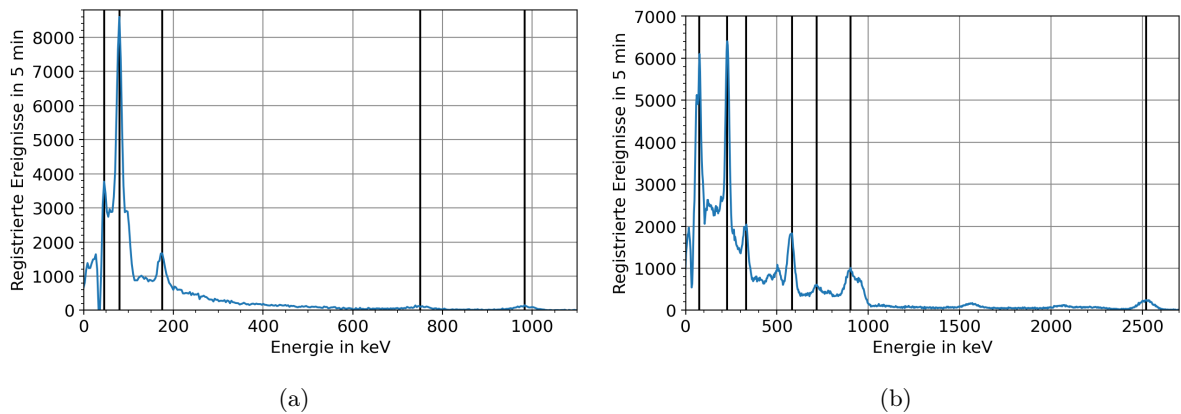


Abbildung 5: Energiespektrum von Uranoxid (a) und Thoriummetall (b) mit schwarz eingezeichneten Peaks

$E_U$ [keV]	Nuklide <sub>U</sub>	$E_{Th}$ [keV]	Nuklide <sub>Th</sub>	$E_W$ [keV]	Nuklide <sub>W</sub>
$46 \pm 12$	U-238	$77 \pm 17$	vgl. Abschnitt 6.3	$61 \pm 12$	Am-241
$80 \pm 12$	Th-234	$228 \pm 23$	Ra-224 oder Pb-212	$175 \pm 10$	ev. Ra-226
$175 \pm 12$	Ra-226	$332 \pm 15$	Ac-228	$228 \pm 12$	Ra-224
$755 \pm 32$	Pa-234	$502 \pm 29$	Tl-208	$286 \pm 12$	Pb-214
$983 \pm 21$	Pa-234	$582 \pm 29$	Tl-208	$342 \pm 12$	Pb-214
		$718 \pm 24$	Bi-212	$601 \pm 10$	Bi-214
		$903 \pm 41$	Ac-228	$764 \pm 21$	Pa-234
		$2519 \pm 44$	ev. Tl-208	$1097 \pm 16$	ev. Bi-214

Tabelle 1: Charakteristische Energien bei der Messung mit Uranoxid (U), Thoriummetall (Th) und einem Wecker mit Leuchtziffern (W) mit dazu passenden Nukliden. Der Zusatz „ev.“ weist darauf hin, dass die  $\gamma$ -Energien der angegebenen Nuklide knapp nicht innerhalb der Energieunsicherheiten der jeweiligen Peaks liegen.

Nukliden in Tabelle 1 aufgetragen.

Auffällig ist hierbei, dass alle gefundenen Nuklide außer Am-241, Pa-234 und Ra-224 aus der  $4n + 2$ -Reihe ab Radium-226 stammen. Tatsächlich wurde früher vor allem Ra-226 für Leuchtfarben verwendet. Teilweise ist auch Ra-228 in ihnen enthalten [3]. Dieses Isotop kann in drei Zwischenschritten zu dem detektierten Ra-224 zerfallen (vgl. Nuklidkarte in [6]).

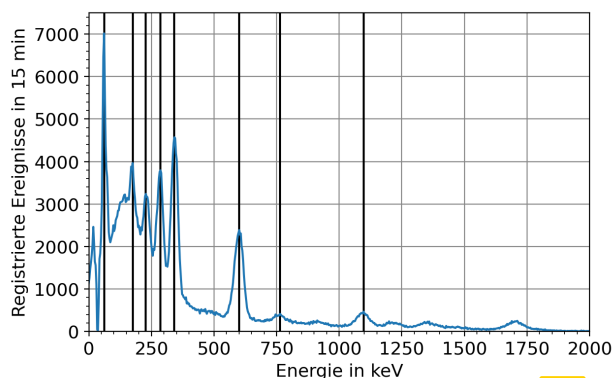
## 5.9 Strahlenbelastung durch Höhenstrahlung

Da für die Messung der Höhenstrahlung die Energie-Eichung verändert werden musste, muss erneut ermittelt werden, welcher Kanal zu welcher Energie gehört. Dazu wurde ein Kalibrierspektrum von Co-60 aufgenommen (Abbildung 7a). Das Vorgehen ist analog zu dem in Teil 5.1. Aus dem Fit (Abbildung 7b) erhält man für die Geradengleichung  $a \cdot n + b$  die Parameter  $a = (0,049\,18 \pm 0,004\,20)$  MeV und  $b = (-0,001 \pm 0,015)$  MeV.

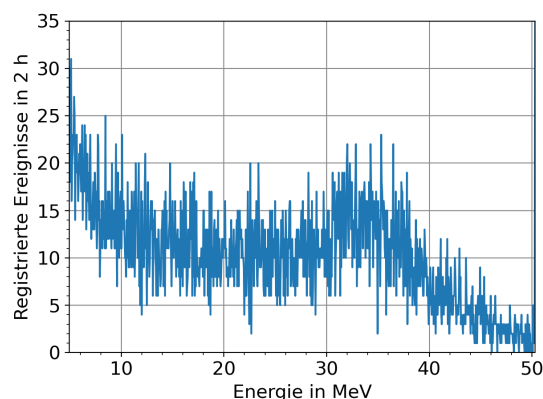
Abbildung 6b zeigt das aufgenommene Spektrum der Höhenstrahlung. Die Auswertung der Messdaten ist in Tabelle 2 aufgetragen. Die Kanäle 1-99 wurden vernachlässigt, da diese hauptsächlich radioaktive Nuklide registriert haben.

Für die neun Kanalbereiche mit jeweils hundert Kanälen wurde die Summe der registrierten Teilchen sowie die mittlere Energie des Bereichs berechnet. Anschließend wurde die Summe der Energie für jeden Kanalbereich bestimmt. Bei der Fehlerrechnung wurden die Unsicherheiten der Fitparameter der Kalibrierungs-Geraden sowie die statistische Unsicherheit der registrierten Ereignisse  $u(N) = \sqrt{N}$  berücksichtigt.

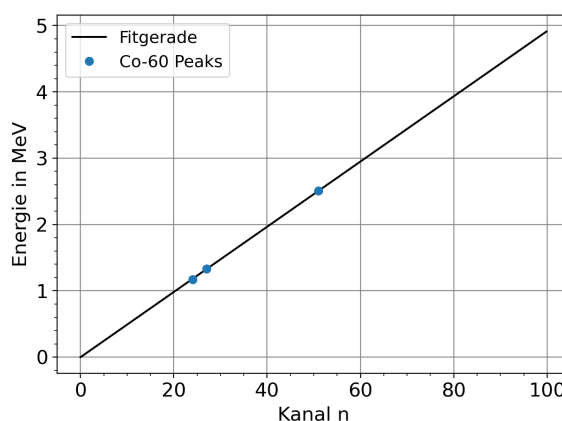
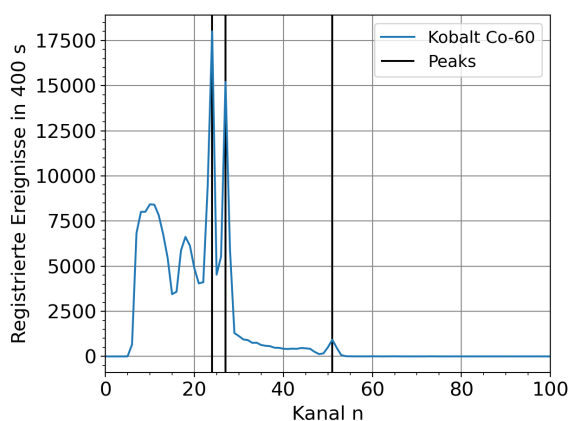




(a) Aufgenommenes radioaktives Spektrum eines Leuchtzeigers mit schwarz eingezeichneten Peaks



(b) Aufgenommenes Spektrum der Höhenstrahlung innerhalb von 2 Stunden. Der Bereich unter 5 MeV wurde abgeschnitten, da dort hauptsächlich Zerfälle von radioaktiven Nukliden registriert wurden.



(a) Über 400 Sekunden aufgenommenes Spektrum Co-60. (b) Die Kanalnummern der charakteristischen Peaks. Die vertikalen Linien markiert die Position der für CO- mit den dazugehörigen Energien und linearer Fitgerade-60 charakteristischen Energien  $E_1 = 1173 \text{ keV}$ ,  $E_2 = 1333 \text{ keV}$  und  $E_3 = 2506 \text{ keV}$ . Die Energie  $E(n) = a \cdot n + b$  mit  $a = (0,04918 \pm 0,00042) \text{ MeV}$  und  $b = (-0,001 \pm 0,015) \text{ MeV}$ .

Die gesamte an den Detektor übertragene Energie berechnet sich aus der Summe der in Tabelle 2 gezeigten Summen für die Kanalbereiche. Man erhält  $E_{2h, \text{Detektor}} = (219,9 \pm 69,5) \text{ GeV}$ .

Um die Strahlenbelastung pro Jahr und Kilogramm zu erhalten, wird das Ergebnis durch die in Teil 5.2 berechnete Masse des Detektors geteilt und auf ein Jahr hochgerechnet. Damit ergibt sich  $E_{\text{ges}} = (0,122 \pm 0,039) \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$ . Das liegt in der Größenordnung des Literaturwerts von  $E_{\text{lit}} = 1,3 \frac{\text{mSv}}{\text{a}}$ . Die Abweichung könnte durch die Annahme entstehen, dass ein Kilogramm des NaI-Kristalls genau so viel Strahlung absorbiert wie 1 Kilogramm Mensch.

## 5.10 Erklärung der starken Absorption bei 34 keV

Interessant ist, dass bei allen Spektren eine sehr starke Absorption bei ca. 34 keV stattfindet. Abbildung 8 zeigt diese Absorption für verschiedene Messreihen. Bei einer Energie von 33-36 keV werden unabhängig von dem beobachteten Präparat fast keine Teilchen registriert. Das legt nahe, dass dies etwas mit dem Detektor oder der Luft im Praktikumsraum zu tun hat.

Eine mögliche Erklärung hierfür liefert die K-Schalen-Absorption. Hat ein Photon eine Energie, welche nur etwas größer ist als die Bindungsenergie der Elektronen in der K-Schale, kommt es mit großer Wahr-

Kanalbereich	Anzahl reg. Ereignisse	mittlere Energie [MeV]	gesamte Energie [MeV]
100 – 199	$1677 \pm 41$	$7,31 \pm 0,14$	$11890 \pm 2910$
200 – 299	$1221 \pm 35$	$12,21 \pm 0,14$	$14850 \pm 4190$
300 – 399	$1091 \pm 33$	$17,12 \pm 0,14$	$18630 \pm 5550$
400 – 499	$1024 \pm 32,0$	$22,03 \pm 0,14$	$22600 \pm 6930$
500 – 599	$1044 \pm 32$	$26,95 \pm 0,14$	$28200 \pm 8580$
600 – 699	$1342 \pm 37$	$31,86 \pm 0,14$	$43000 \pm 11500$
700 – 799	$1139 \pm 34$	$36,77 \pm 0,14$	$41800 \pm 12100$
800 – 899	$583 \pm 24$	$41,70 \pm 0,14$	$24210 \pm 9790$
900 – 999	$272 \pm 16$	$46,62 \pm 0,14$	$12620 \pm 7210$

Tabelle 2: Auswertung der Messung der Höhenstrahlung: Die Tabelle zeigt die Anzahl der registrierten Ereignisse, die mittlere Energie der Strahlung und die gesamte übertragene Energie für die verschiedenen Kanalbereiche

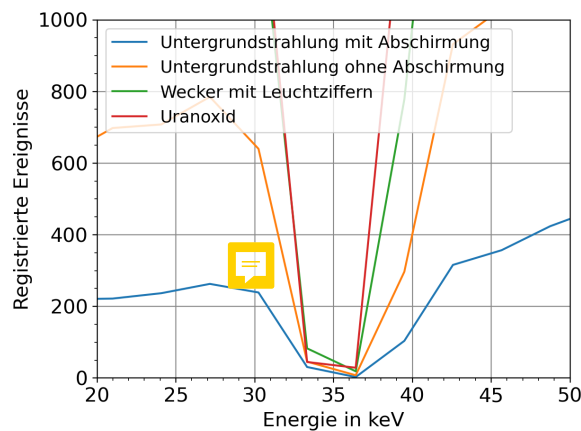


Abbildung 8: Spektren verschiedener Präparate. Bei allen sieht man eine „Lücke“ zwischen 33-36 keV, bei der nahezu keine Teilchen registriert werden.

scheinlichkeit zum Photoeffekt, das bedeutet das Photon wird absorbiert und löst dabei ein Elektron aus der K-Schale aus.

Die Bindungsenergie der Elektronen auf der K-Schale von Iod beträgt  $33,2 \text{ keV}$  [2], passt also genau zur Beobachtung. Die Photonen, die im NaI-Kristall durch das Thallium erzeugt werden, werden also mit großer Wahrscheinlichkeit direkt im Kristall wieder absorbiert, wenn sie eine Energie etwas größer als  $33,2 \text{ keV}$  besitzen. Dementsprechend können sie im Photomultiplier keine Elektronenlawine erzeugen und werden nicht registriert.

## 6 Fragen

### 6.1 Definition von Elektronenvolt

Per Definition ist  $1 \text{ keV}$  die Änderung der kinetischen Energie eines Elektrons, das mit  $1 \text{ kV}$  beschleunigt wird. Für die Umrechnung von  $\text{eV}$  in  $\text{J}$  muss man lediglich den in  $\text{eV}$  angegebenen Wert mit der Elementarladung  $e = 1.602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  [1] multiplizieren. Zum Beispiel entspricht  $4 \cdot 10^{12} \text{ GeV}$  also ca.  $641 \text{ J}$ . Im Vergleich dazu beträgt benötigt man  $98,1 \text{ J}$ , um einen Liter Wasser auf der Erde  $10 \text{ m}$  hochzupumpen. Und  $4,18 \text{ J}$  sind nötig, um bei Normbedingungen  $1 \text{ g}$  Wasser um  $1 \text{ K}$  zu erwärmen.

## 6.2 Breite der Peaks

Die Breite der Peaks steht im Zusammenhang mit der Heisenbergschen Unschärferelation. Je länger die Lebensdauer der betrachteten Teilchen ist, desto schmaler wird der zugehörige Peak bzw. dessen Halbwertsbreite.

Unter dieser versteht man das Intervall auf der x-Achse zwischen denjenigen Werten, an denen die Kurve  $1/\sqrt{2}$  mal so groß wie die Maximalamplitude des Peaks ist [8].

## 6.3 Linie bei 77 keV

Zusätzlich zu den Linien bei höheren Energien lässt sich in den Messungen ein Peak bei 77 keV feststellen. Dieser entsteht dadurch, dass die beim Zerfall freigesetzten Elektronen andere Elektronen aus der Bleiabschirmung ionisieren.

Dabei werden die Blei-Elektronen aus einer inneren Schale "herausgeschlagen", wodurch unbesetzte Elektronenzustände entstehen. Diese werden durch Elektronen von höheren Energieniveaus aufgefüllt, welche beim Übergang  $\gamma$ -Strahlung mit einer Energie von 77 keV emittieren [7].

## 6.4 Unsicherheit der Zählraten

Betrachtet man die relative Unsicherheit  $\frac{\sqrt{n}}{n}$  aus der Poissonverteilung, dann fällt auf, dass diese für  $n \rightarrow \infty$  gegen Null geht. Somit werden die Messergebnisse für die Zählraten umso präziser, je größer die Zählrate  $n$  ist. [5]

## 6.5 Aktivitätsverlauf

Bei einer erst kürzlich gereinigten radioaktiven Probe steigt die Aktivität an, da immer mehr Kerne in Tochterkerne zerfallen (Zerfallsreihe). Dabei kann sich jedoch ein Gleichgewicht einstellen, wenn gleich viele Tochterkerne weiter zerfallen wie Neue nachgebildet werden. Sind jedoch nur noch wenige Nuklide des ursprünglichen Materials vorhanden, nimmt die Aktivität gemäß dem Zerfallsgesetz ab.

## 6.6 Abschirmung von Strahlung

Um  $\alpha$ -Strahlung abzuschirmen, reicht ein einfaches Blatt Papier aus.  $\beta$ -Strahlung lässt sich mit einer einige Zentimeter dicken Aluminium-Schicht abschirmen. Für die Abschirmung von  $\gamma$ -Strahlung wird, wie im Praktikum, eine dicke Bleischicht verwendet [12].

## 6.7 Thorium-Linien

Die Thorium-Linie bei 2615 keV stammt vom  $\beta^-$  Zerfall des Th-208 Isotops aus der Thorium-Zerfallsreihe. Bei dieser Energie kann es zur Paarbildung kommen, wobei ein Elektron und ein Positron erzeugt werden. Entkommt eines dieser Teilchen aus dem verwendeten NaI-Kristall und wird nicht detektiert, verringert sich die gemessene Energie um die Ruheenergie  $m_e \cdot c^2 = 511$  keV des Teilchens zu 2104 keV. Werden sogar beide Quanten vom Detektor nicht erfasst, erhält man eine Linie bei  $(2615 - 2 \cdot m_e \cdot c^2)$  keV=1593 keV.

## 6.8 NaI-Kristall

Einfallende  $\gamma$ -Quanten können mit den Atomen des NaI-Kristalls durch den Photoeffekt, den Comptonneffekt oder die Paarbildung reagieren.

Durch all diese Vorgänge werden schnelle Elektronen freigesetzt, die ihrerseits weitere Elektronen erzeugen. Diese regen das im NaI-Kristall eingelagerte Thallium an, welches bei der Rückkehr in den Grundzustand Lichtblitze aussendet.

Die Lichtblitze erzeugen durch den Photoeffekt im Photomultiplier mit angelegter Hochspannung eine Elektronenlawine, welche ein messbares Signal erzeugt. Dieses wird von einem Vorverstärker und einem Dopperverstärker weiter verstärkt, bevor es am Computer dargestellt werden kann.

## 7 Anhang

### 7.1 Energieunsicherheiten der Peaks

Wie in Abschnitt 5.5 beschrieben, schätzt man zunächst graphisch die Unsicherheiten  $u(K)$  für die Kanalnummern der Peaks ab. Um daraus die zugehörigen Energieunsicherheiten  $u(E)$  zu erhalten, wendet man die Gaußsche Fehlerfortpflanzung auf Gleichung (4) an und setzt die in Kapitel 5.1 bestimmten Unsicherheiten  $u(a)$  und  $u(b)$  ein.

### 7.2 Charakteristische Energien gewisser Quellen

Isotop	$T_{1/2}$	Zerfall	$\gamma_1$ (keV)	$\gamma_2$ (keV)	$\gamma_3$ (keV)
Na-22	2,6 a	$\beta^+$	1275		
Co-60	5,3 a	$\beta^-$	1173	1333	
Cs-137	30,2 a	$\beta^-$	662(85%)		
Am-241	433 a	$\alpha$	59,5(35%)		
Sr-90	28,8 a	$\beta^-$			
K-40	$1,3 \cdot 10^9$ a	$\beta^+$	1461(11%)		
Uraniumreihe (Auszug):					
U-238	$4,5 \cdot 10^9$ a	$\alpha$	50(21%)		
Th-234	24,1 d	$\beta^-$	63(5%)	93(3%)	93(3%)
Pa-234	1,2 min	$\beta^-$	1001(0,8%)	767(0,3%)	
Ra-226	1600 a	$\alpha$	186(6%)		
Pb-214	26,8 min	$\beta^-$	352(36%)	295(19%)	
Bi-214	19,8 min	$\alpha,(\beta^-)$	609(45%)	1765(15%)	1120(15%)
Thoriumreihe (Auszug):					
Th-232	$1,4 \cdot 10^{10}$ a	$\alpha$			
Ac-228	6,13 h	$\beta^-$	911(27%)	969(16%)	339(11%)
Ra-224	3,46 d	$\alpha$	241(4%)		
Pb-212	10,6 h	$\beta^-$	239(43%)		
Bi-212	60,6 min	$\alpha, \beta^-$	727(7%)		
Tl-208	3,1 min	$\beta^-$	2615(36%)	583(31%)	511(8%) 860(5%)

Tabelle 3: Halbwertszeit  $T_{1/2}$ , Zerfallsart und charakteristische Energien von emittierten  $\gamma$ -Quanten für einige Isotope. (Tabelle aus [6])

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] *Fundamental Physical Constants*. NIST. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e> (besucht am 17.03.2021).
- [2] *K-absorption edge*. URL: <https://radiopaedia.org/articles/k-absorption-edge?lang=us> (besucht am 17.03.2021).
- [3] *Leuchtfarben in der Uhrentechnik*. URL: <https://www.info-uhren.de/leuchtfarben-uhren> (besucht am 17.03.2021).
- [4] *Molke, Labmolke, Sauermolke, Trinkmolke*. URL: <https://www.lebensmittellexikon.de/t0000140.php> (besucht am 16.03.2021).

- [5] Fakultät für Physik. *Hinweise zur Beurteilung von Messungen, Messergebnissen und Messunsicherheiten (ABW)*. Technische Universität München. 4. Juni 2020. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/org/ABW.pdf>.
- [6] Fakultät für Physik. *Radioaktivität*. Technische Universität München. 16. Nov. 2015. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap3/RAD.pdf> (besucht am 15.03.2021).
- [7] Fakultät für Physik. *Röntgenstrahlung (RÖN)*. Technische Universität München. 9. März 2016. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap3/XST.pdf>.
- [8] *Pohlsches Rad (POR)*. 4. Feb. 2021. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap1/POR.pdf> (besucht am 17.03.2021).
- [9] *RAD-Cosmic.xlsx*. URL: <https://www.moodle.tum.de/mod/resource/view.php?id=1498838> (besucht am 17.03.2021).
- [10] *Radionuclide Half-Life Measurements Data*. NIST. 6. Sep. 2009. URL: <https://www.nist.gov/pml/radionuclide-half-life-measurements/radionuclide-half-life-measurements-data> (besucht am 15.03.2021).
- [11] *Reaktorkatastrophe von Tschernobyl*. LEIFiPhysik. URL: <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kernspaltung-und-kernfusion/ausblick/reaktorkatastrophe-von-tschernobyl> (besucht am 16.03.2021).
- [12] *Überblick über die Strahlungsarten*. LEIFiPhysik. URL: <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-einfuehrung/grundwissen/ueberblick-ueber-die-strahlungsarten> (besucht am 16.03.2021).