

Praktikum II
NR: Natürliche Radioaktivität
Betreuer: Dr. Torsten Hehl

Hanno Rein
praktikum2@hanno-rein.de

Florian Jessen
florian.jessen@student.uni-tuebingen.de

06. April 2004

1 Vorwort

Im alltäglichen Leben wird radioaktive Strahlung meistens als gefährlich dargestellt und oft mit Kernkraftwerken und Kernwaffen in Verbindung gebracht. Doch hinter dieser Strahlung verbirgt sich mehr. In der Medizin basieren zahlreiche Diagnosemethoden darauf und Röntgenbilder gehören zum Alltag. Aber auch in der Natur tritt seit jeher radioaktive Strahlung auf. Die Gefährlichkeit hängt davon ab, wie lange man welcher Strahlung ausgesetzt ist.

2 Grundlagen

2.1 Physikalische Größen

Radioaktive Strahlung entsteht zum größten Teil, wenn Atomkerne zerfallen. Man unterscheidet dabei drei Arten der Strahlung. α Strahlung besteht aus Teilchen, die aus je zwei Neutronen und Protonen bestehen, β Strahlung aus schnellen Elektronen und γ Strahlung als energiereiche elektromagnetische Strahlung.

- *Aktivität*

Aktivität bezeichnet die Zahl der Zerfälle in einer Zeiteinheit.

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (1)$$

Die Einheit ist *Becquerel*. Aus dieser Beziehung erhält man auch das Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Die Halbwertszeit ergibt sich durch

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3)$$

- *Energiedosis*

Die Energiedosis beschreibt die Energie, die durch die ionisierende Strahlung auf eine Masse übertragen wird.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (4)$$

Die Einheit ist *Gray* bzw. *J/kg*.

- *Äquivalentdosis*

Um die unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Strahlungen auf den Menschen zu berücksichtigen, wird die Äquivalentdosis eingeführt. Sie unterscheidet sich von der Energiedosis durch einen biologischen Bewertungsfaktor q und wird in *Sievert* bzw. *J/kg* gemessen.

$$H = q \cdot D \quad (5)$$

- *Elektronvolt*

Zur Abgabe von geringen Energien ist die Einheit Elektronvolt beliebt. Diese lässt sich aber auch in Standardeinheiten umrechnen.

$$1\text{eV} = 1.602 \cdot 10^{-19}\text{J} \quad (6)$$

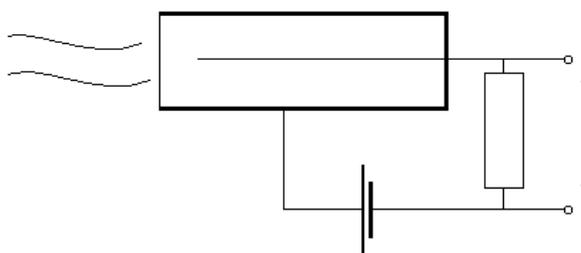
Durch die bekannten Vorsilben $k, M, G, m, \mu, ..$ können die Exponenten in bekannter Art und Weise verschoben werden.

2.2 Nachweismethoden

Alle Nachweismethoden arbeiten mit ionisierten Teilchen. Das bedeutet, dass γ Strahlung nicht direkt nachgewiesen werden kann, sondern nur Ionen, die durch diese erzeugt werden. Dies kann durch Paarbildung, den Comptoneffekt, oder aber auch beim Photoeffekt geschehen. Der Schutz vor ionisierter Strahlung wird auf verschiedene Arten realisiert.

2.2.1 Geiger-Müller-Zählrohr

Das Geiger-Müller-Zählrohr besteht aus einer zylinderförmigen Kammer mit einem Draht im Zentrum. Zwischen diesem Draht und der Außenwand wird über einen Widerstand eine Spannung angelegt. Durch ein Graphit-Fenster können die Teilchen in eine Kammer eindringen, in der sich ein Restgas befindet. Dieses wird ionisiert und es entsteht ein leitfähiger Kanal zwischen Wand und Draht. Dies führt zu einem Spannungsabfall am Widerstand, der weiterverarbeitet werden kann.



2.2.2 Halbleiter-Zähler

An den pn-Übergang der Halbleiterdiode wird in Sperrichtung eine Spannung von einigen kV angelegt. Treffen geladene Teilchen auf diesen Bereich, so entstehen Elektron-Loch-Paare, die als Ladungsimuls gemessen werden können. Damit die Diode nicht zerstört wird ist eine dauernde Kühlung mit Stickstoff notwendig. Ein Vorteil dieser Zähler ist, dass sie sich relativ einfach in einem Array anordnen lassen und man so auch die Herkunft der Strahlung bestimmen kann.

2.2.3 Szintillations-Zähler

Der verwendete Szintillations-Zähler besteht aus einem NaI Kristall. Treffen die hochenergetischen Teilchen auf, so geben sie ihre kinetische Energie an die Gitteratome ab. Diese werden angeregt und senden Lichtblitze aus. Diese Blitze kann man zählen. Um jedoch die Energie der Teilchen zu bestimmen wird dieses Signal an einen Photomultiplier weitergeleitet. In diesem erzeugen die eintreffenden Photonen an der Photokathode Elektronen, die zur ersten Dynode beschleunigt werden und dort weitere Elektronen auslösen. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrfach und schließlich wird an der Anode ein Signal ausgelöst. Durch eine Elektronik wird dieses ausgewertet.

2.2.4 Messfehler

Bei jedem Messverfahren wird nur ein Teil der tatsächlichen Strahlung erfasst. Dies liegt daran, dass die Teilchen zum Großteil nicht senkrecht auftreffen, einen Teil der Energie beim Eindringen in das Material abgeben, oder auch daran, dass die Detektoren die Teilchen nicht in beliebig kurzen Abständen einzeln registrieren können. Daher kann es vorkommen, dass statt zwei Teilchen ein Teilchen mit der Summe der Energie gemessen wird, oder nur ein Anteil der tatsächlichen Energie.

2.2.5 Besonderheiten

Bei frischen Präparaten kann es zu besonderen Erscheinungen kommen. Da jetzt nur das erste Nuklid der Zerfallsreihe vorhanden ist, steigt die Zahl der aktiven Kerne zu Beginn an, da nun die fehlenden Tochterkerne gebildet werden, die selbst weiter zerfallen. Nach einer gewissen Zeit stabilisiert sich dieser Vorgang, bis schließlich die ersten Atome das Ende der Zerfallsreihe erreichen. Von nun an nimmt die Zahl der Kernzerfälle in gewohnter Art und Weise ab.

2.3 Thoriumlinien

Um die auftretenden Th-Linien zu verstehen, muss man sich die Zerfallsreihe des in der Natur vorkommenden ^{232}Th -Isotops anschauen.

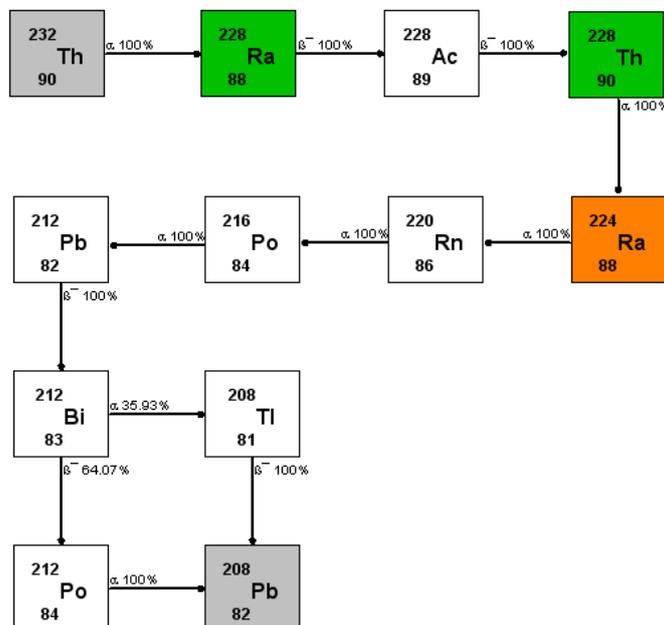


Abbildung 1: Zerfallsreihe von ^{232}Th

Beim Zerfall von ^{208}Tl zu ^{208}Pb wird ein Gamma-Quant mit einer Energie in Höhe von $E_0 = 2614,5$ keV ausgesendet. Da die Energie größer ist als die zweier Elektronen, kann Paarbildung stattfinden. Somit verringert sich die gemessene Energie bei einigen Quanten auf $E_1 = E_2 - 2 \cdot 511$ keV = 1592,5 keV. In der Messapparatur können sich aber auch die Energien des übriggebliebenen Gammaquants und des entstandenen Elektrons/Positrons überlagern, womit man die Linie bei einer Energie $E_2 = E_1 + 511$ keV = 2103,5 keV erklären kann.

2.4 Abschirmung

Eine erste sehr wirkungsvolle Maßnahme zum Schutz vor radioaktiver Strahlung ist das Einhalten großer Abstände zu den Strahlenquellen. Die Strahlenbelastung sinkt mit der Entfernung proportional zu $\frac{1}{r^2}$ ab. Bei Teilchenstrahlung spielt dabei nicht nur die Verteilung auf eine größere Fläche, sondern auch die Wechselwirkung mit den Molekülen der Luft eine Rolle. Sollten diese Maßnahmen nicht ausreichen oder nicht praktikabel sein, so hilft eine Abschirmung weiter. Dazu stellt man den Strahlen Wände in den Weg. Die Wahl des Materials und die Materialstärke sind dabei abhängig von Art der Strahlung und ihrer Energie. γ Strahlung kann effektiv mit Blei absorbiert werden, für β und α Strahlung sind dicke Kunststoffe oft ausreichend. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Entstehung von Bremsstrahlung und Sekundärteilchen vermieden wird. Die hochenergetische kosmische Strahlung wird in der Erdatmosphäre allmählich in viele niedrigerenergetische Teilchen umgewandelt. Die Strahlenbelastung wird bereits dadurch stark reduziert. Reicht diese Abschirmung nicht aus, so kann man die Strahlung weiter minimieren, indem man in die Erdkruste hinein geht.

2.5 Krebserkrankungen durch radioaktive Strahlung

Man geht davon aus, dass pro 60 Sv eine Erkrankung ausbricht. In Deutschland leben rund $8,2 \cdot 10^7$ Menschen, die durchschnittliche jährliche Strahlenbelastung beträgt etwa 4 mSv. Somit gibt es statistisch gesehen jährlich circa 5500 Krebserkrankungen auf Grund von Strahlenbelastungen. Dies entspricht gerade einmal 1,6 % der registrierten jährlichen Neuerkrankungen in Deutschland.

3 Auswertung

Zuerst werden die Skalen der Messapparatur mit Proben, deren Spektren bekannt sind, geeicht. Danach werden Spektren verschiedenster Materialien und der Umwelt aufgenommen und analysiert.

3.1 Aktivität von K40

Die Messung ergab abzüglich des Untergrundspektrums folgende Verteilung

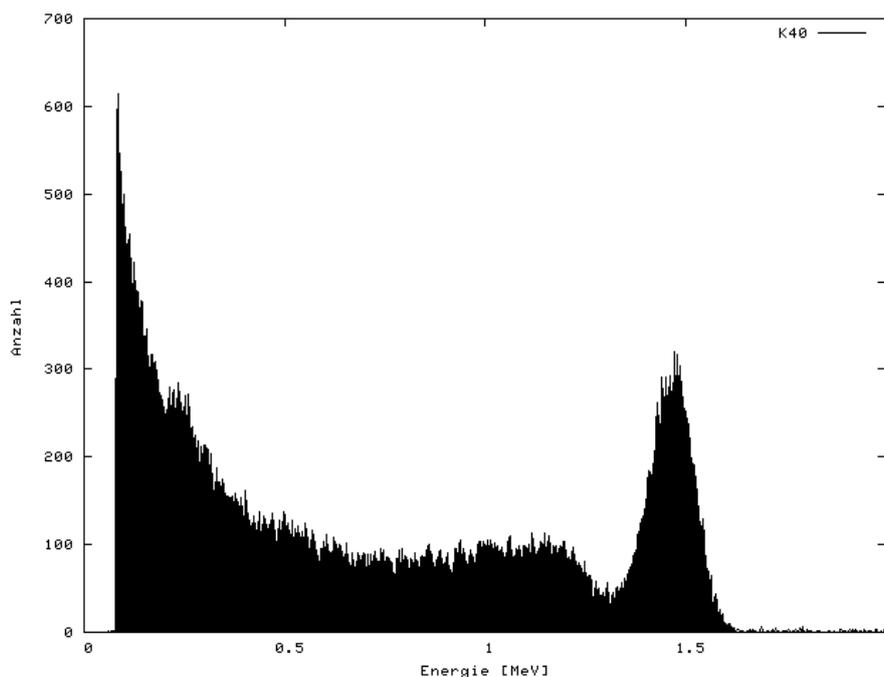


Abbildung 2: Kalium 40 (1200s)

Insgesamt wurden in 1200 Sekunden 72448 Ereignisse gemessen. Daraus ergibt sich die Aktivität zu

$$A = 60.37\text{Bq}$$

Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass nur die Strahlung in einer von sechs möglichen Raumrichtungen gemessen wurde. Die tatsächliche Aktivität liegt daher bei

$$A_0 = 362.24\text{Bq} \quad (7)$$

Der theoretisch zu erwartende Wert lässt sich ebenfalls bestimmen. Eine Probe aus 300g KCl enthält

$$N = \frac{300}{74.555} \cdot 6.022 \cdot 10^{23} = 2.42 \cdot 10^{24} \quad (8)$$

Teilchen. $K40$ tritt jedoch nur zu einem Anteil von etwa 0.012% auf und auch dieser zerfällt nur zu 10% unter Abstrahlung von Gamma-Quanten. Dies sind

$$N_{K40\gamma} = 1.2 \cdot 10^{-5} \cdot 2.42 \cdot 10^{24} = 2.91 \cdot 10^{19} \quad (9)$$

Teilchen. Die Halbwertszeit beträgt $1.28 \cdot 10^9$ Jahre. Die Aktivität beträgt daher

$$A_{theoretisch} = \frac{2.91 \cdot 10^{19} \cdot \ln 2}{1.28 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \text{sec}^{-1} = 499.32\text{Bq} \quad (10)$$

Der Messwert liegt bei 72.55% des theoretischen. Unter Berücksichtigung der Versuchsbedingungen ist diese Abweichung durchaus zu erklären. So wurde beispielsweise nicht berücksichtigt, dass die Probe sicherlich nicht mehr zum angenommenen Teil aus $K40$ besteht und dass der Detektor nicht jedes Gamma-Quant registriert hat.

3.2 Dosisabschätzung

3.2.1 Natürliche Strahlenbelastung

Die Masse m des zylindrischen NaI-Kristalls ist

$$m = \pi \cdot h \cdot r^2 \cdot \rho \quad (11)$$

$$= \pi \cdot 7.62 \text{ cm} \cdot (3.81 \text{ cm})^2 \cdot 3.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad (12)$$

$$= 1.2857 \text{ kg} \quad (13)$$

Die nachgewiesene Gesamtenergie E beträgt

$$E = \sum_{i=0}^{1023} N_i \cdot E_i \quad (14)$$

$$= 6.244 \cdot 10^{11} \text{ eV} \quad (15)$$

Umgerechnet auf eine Masse $m = 75 \text{ kg}$ (menschlicher Körper) ergibt dies eine Gesamtenergie von

$$E_{Mensch} = \frac{75}{1.2857} \cdot \frac{1 \text{ a}}{2 \text{ h}} \cdot E \quad (16)$$

$$= 1.595 \cdot 10^{17} \text{ eV} \quad (17)$$

$$= 2.556 \cdot 10^{-2} \text{ J} \quad (18)$$

pro Jahr, was einer Äquivalentdosis von

$$H = 1 \cdot \frac{E_{Mensch}}{75 \text{ kg}} \quad (19)$$

$$= 0.341 \text{ mSv} \quad (20)$$

entspricht. Dieser Wert liegt in der erwarteten Größenordnung.

3.2.2 Zusätzliche Strahlenbelastung durch einen Stein

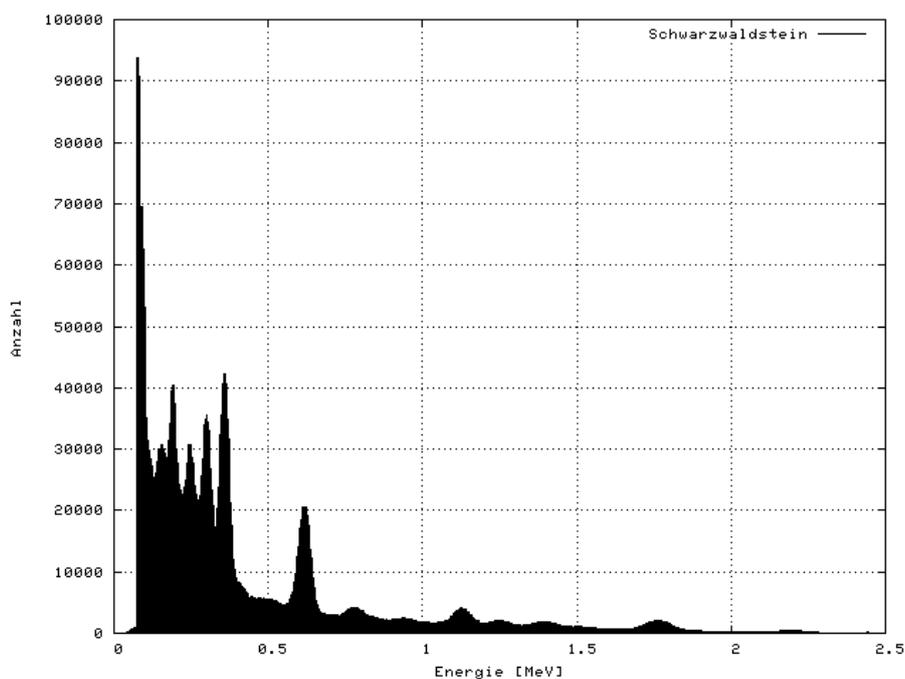


Abbildung 3: Schwarzwaldstein (600s)

Die Energie, die der untersuchte Stein aus dem Schwarzwald innerhalb von 10 min abgibt beträgt nach unsere Messung abzüglich des Untergrundspektrums:

$$E_{Stein} = 9.723 \cdot 10^{13} \text{ eV} \quad (21)$$

$$= 1.558 \cdot 10^{-5} \text{ J} \quad (22)$$

Angenommen man würde den Stein die ganze Zeit über bei sich tragen, käme man auf eine zusätzliche jährliche Äquivalenzdosis von

$$H_{zus} = \frac{1}{1.2857 \text{ kg}} \cdot \frac{1 \text{ a}}{10 \text{ min}} \cdot E_{Stein} \quad (23)$$

$$= 637 \text{ mSv} \quad (24)$$

Hierbei wurde nicht berücksichtigt, dass der menschliche Körper auf Grund geometrischer Überlegungen einen anderen Anteil der Strahlung aufnimmt, als der Kristall. Außerdem ist die Dosis der Körperteile (Gewebedosis), die nahe an dem Stein liegen wesentlich höher als die berechnete durchschnittliche Dosis (Ganzkörperdosis). Trotzdem zeigt sich, dass die zusätzliche Dosis die natürliche Dosis um mehrere Größenordnungen übersteigt.

Anhang - PHP-Code

Code zur Aufsummierung der Energien

```
$datei = file("./STEIN_R.TXT");
while($i<count($datei)){
    $i++;
    $dat2 = explode("\t",trim($datei[$i]));
    $energ = ((int)trim($dat2[0]))*191/59750+2403/239000;
    $dat2[0] = "";
    $dat2 = implode("",$dat2);
    $sume += $energ*trim($dat2);
}
echo "Summe: ".$sume." MeV";
```