

NR - Natürliche Radioaktivität

Praktikum Wintersemester 2005/06

Alexander Rembold, Philipp Buchegger, Johannes Märkle
Assistent Dr. Torsten Hehl

Tübingen, den 7. Dezember 2005

Theorie und Grundlagen

Halbwertszeit

Die Kerne einiger Isotope sind instabil und zerfallen nach einer gewissen Zeit. Der Zerfall erfolgt exponentiell, das heißt in gleichen Zeitschritten ändert sich die Anzahl N um den gleichen Faktor. Die Halbwertszeit ist der Zeitraum, nach dem sich die Anzahl um die Hälfte reduziert hat.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Somit folgt für die Halbwertszeit T :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2)$$

Strahlungsarten

Bei radioaktiven Zerfällen wird zwischen drei verschiedenen Arten von Strahlung unterschieden:

- **α -Strahlung** besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen (Heliumkerne) und hat die kürzeste Reichweite. Sie kann schon durch ein Blatt Papier vollständig abgeschirmt werden.
- **β -Strahlung** besteht aus schnellen Elektronen und hat ebenfalls nur eine Reichweite von wenigen Zetimetern.
- **γ -Strahlung**: Es handelt sich hierbei nicht um Strahlung, die direkt beim Zerfall entsteht. Nach einem α -oder β -Zerfall kann ein Kern im angeregten Zustand übrig bleiben. Beim Übergang in ein niedrigeres Energieniveau wird γ -Strahlung ausgesandt. Deshalb ist es auch falsch von einem γ -Zerfall zu sprechen. Diese Strahlung ist sehr energiereich, weil sie sehr kurzweilig ist. Man kann sie nur durch meterdicken Stahlbeton oder Bleiplatten abschirmen.

Aktivität, Energiedosis und Äquivalentdosis

Aktivität A

Man bezeichnet die Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit als Aktivität:

$$A = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N_0 \quad (3)$$

Ihre Einheit ist Becquerel, 1 Becquerel entspricht einem Zerfall pro Sekunde. Aus dieser Beziehung erhält man auch das Zerfallsgesetz.

Energiedosis D

Sie beschreibt die Energie, die durch ionisierende Strahlung auf eine bestimmte Masse übertragen wird.

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

Ihre Einheit ist Gray = $\frac{J}{kg}$

Äquivalenzdosis H

Diese Größe wurde eingeführt, da die Energiedosis die unterschiedliche Gefährlichkeit der Strahlungsarten für Gewebe nicht berücksichtigt. Somit ist die Äquivalentdosis für die Messung der Strahlenbelastung von Lebewesen entscheidend. Man hat dafür den biologischen Bewertungsfaktor q eingeführt und es gilt:

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

Ihre Einheit ist Sievert $Sv = \frac{J}{kg}$

Fragen zum Versuch

keV in Si Einheiten

$1keV$ entspricht der Energie, die ein Elektron besitzt, das mit einer Spannung von $1kV$ beschleunigt wurde. Somit erhält man:

$$1keV = 1,620 \cdot 10^{-16} J \quad (6)$$

Halbwertsbreite

Sei bei x_0 das Maximum einer Funktion. Unter der Halbwertsbreite versteht man nun den Abstand zwischen zwei Stellen x_1 und x_2 , für die gilt $f(x_1) = f(x_2) = \frac{1}{2}f(x_0)$. Für eine Gaußkurve der Form $f(x) = Ne^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ ergibt sich dann

$$f(x) = Ne^{-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{2} \quad (7)$$

wobei $\Delta x = x_{\frac{1}{2}} - x_0$ mit $f(x_{\frac{1}{2}}) = \frac{1}{2}f(x_0)$. Hieraus folgt

$$\Delta x = \sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot \sigma \quad (8)$$

Aus der Symmetrie der Gaußverteilung ergibt sich dann für die Halbwertsbreite

$$h = 2 \cdot \Delta x = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot \sigma \quad (9)$$

Die Halbwertsbreite wird in einem Szintillator hauptsächlich durch die hohe statistische Schwankung der Anzahl der gebildeten Photonen bestimmt. Ein Grund für die hohe Schwankung stellen dabei mögliche Energieverluste dar. Für die Bildung eines Photoelektrons werden **400 eV - 1000 eV** benötigt. Zudem tragen im Szintillator unter anderem thermische Gitterschwingungen, die das Auflösungsvermögen beeinträchtigen, zu einer größeren Halbwertsbreite bei.

Anstieg der Aktivität eines frisch gereinigten Präparats

Untersucht man ein frisch gereinigtes radioaktives Präparat, so wird man zuerst eine Steigerung der Aktivität feststellen. Dies hängt damit zusammen, dass bei jedem Zerfall eines Kernes meist weitere radioaktive Produkte entstehen, die ihrerseits wieder radioaktive Strahlen abgeben. Aus lediglich einem Kern entstehen folglich mehrere Quellen für radioaktive Strahlung. Dieser Vorgang hält solange an bis die Enden der Zerfallskette erreicht sind. Ab diesem Zeitpunkt wird man eine exponentielle Abnahme der Radioaktivität feststellen.

Abschirmung

- α -Teilchen wechselwirken mit Materie hauptsächlich durch Ionisation oder Anregung der Moleküle. Diese Ionen werden in der Materie in sehr großer Dichte erzeugt, wodurch die Alphateilchen sehr schnell an Energie verlieren. Darum ist die Reichweite solcher Strahlung sehr gering und sie wird dadurch bereits durch ein Blatt Papier abgeschirmt. Die Reichweite von α -Strahlern reicht in Luft in Abhängigkeit ihrer Energie von ca. 0,3 cm (bei ungefähr 1 MeV) bis hin zu 10,5 cm (bei ungefähr 10 MeV). Dies hat zur Folge, dass nach wenigen cm Luft keine Bestrahlung durch α -Teilchen mehr möglich ist, jedoch ist eine Gefahr durch Sekundärstrahlung des Absorbermaterials nicht auszuschließen.
- Die Reichweite von β -Teilchen ist ebenfalls sehr begrenzt. Sie liegt in Luft zwischen 3 mm (Bei einer Teilchenenergie von 0,01 MeV) und ca. 80 m (Bei einer Teilchenenergie von 20 MeV). Für β -Strahler gilt: Je größer die Dichte und Ordnungszahl des Abschirmmaterials, desto mehr Energie verlieren die β -Teilchen auf einer bestimmten Strecke, da sie mit den Hüllenelektronen der Atome in Wechselwirkung treten.
- γ -Quanten können theoretisch beliebig dicke Materieschichten durchdringen, wobei die Wahrscheinlichkeit dafür mit wachsender Schichtdicke immer geringer wird. Dadurch wird eine Vorhersage über die Reichweite wesentlich schwieriger als für α - oder β -Strahlung. Die Betrachtung einer Halbwertschicht, also die Angabe einer Schichtdicke, bei der die Intensität der γ -Strahlung auf die Hälfte abgenommen hat, stellt sich dabei als sinnvoll heraus. Die Halbwertschicht für Wasser in Abhängigkeit der Strahlungsenergie reicht von 4,15 cm (bei einer Strahlungsenergie von 1 MeV) bis hin zu 40,2 cm (bei einer Strahlungsenergie von 100 MeV). Bei Blei reicht die Dicke der Halbwertschicht bei äquivalenter Energie von 1,75 cm bis 12,5 cm. Dies ist auch der Grund warum zur Abschirmung von γ -Strahlen meist sehr dicken Bleiplatten verwendet werden.

Natürliche Radioaktivität

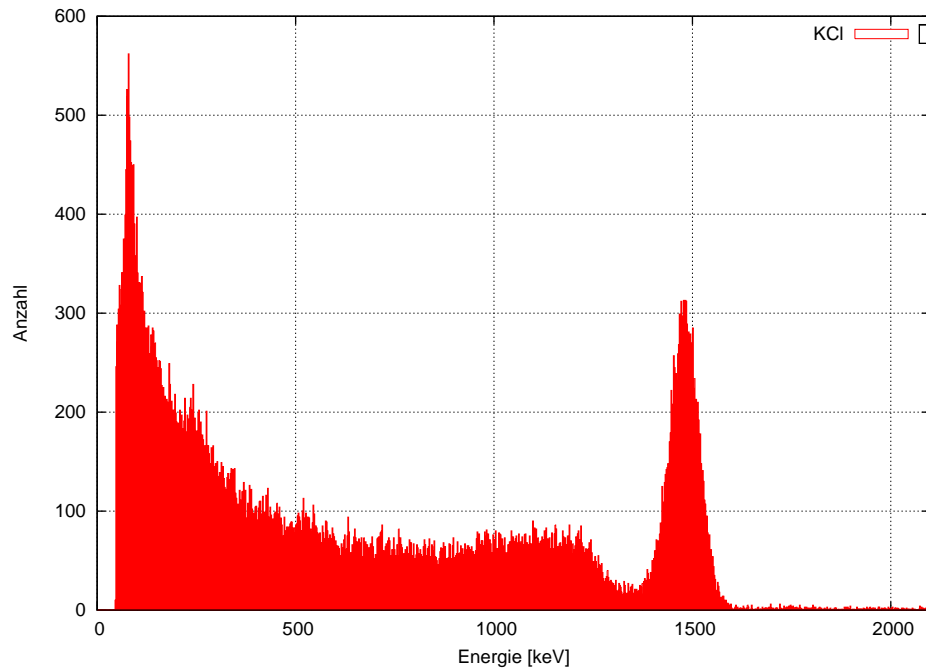
Geht man von einer durchschnittlichen Strahlenbelastung von ungefähr 2,4 mSv pro Jahr in Deutschland aus (<http://www.schulphysik.de/radio1.html>) und setzt man eine Krebserkrankung pro 60 Sv an, so ergeben sich für Deutschland mit 82 468 Einwohnern (Stand 2005) grob nach oben abgeschätzt 3300 Neuerkrankte. Im Vergleich zu 340 000 Neuerkrankungen (<http://www.netdoktor.de/krankheiten/fakta/krebs.htm>) ist dies folglich ein verschwindend geringer Anteil.

Thoriumlinien

In der Thoriumzerfallsreihe zerfällt in einem Zwischenschritt Thallium ^{208}Tl zu Blei ^{208}Pb . Dabei kann ein Positron und ein Elektron entstehen (Paarbildung). Das Positron reagiert zusammen mit einem Elektron des NaI-Kristalls. Dabei werden zwei γ -Quanten der Energie 511 keV ausgesandt. Verlässt keines dieser Quanten den Kristall ohne dort Wechselzuwirken wird eine Energie von 2615 keV gemessen. Verlässt eines der Beiden Quanten den Kristall ohne Wechselzuwirken so misst man eine Energie von 2104 keV. Verlassen beide Quanten den Kristall ohne detektiert zu werden erhält man 1593 keV.

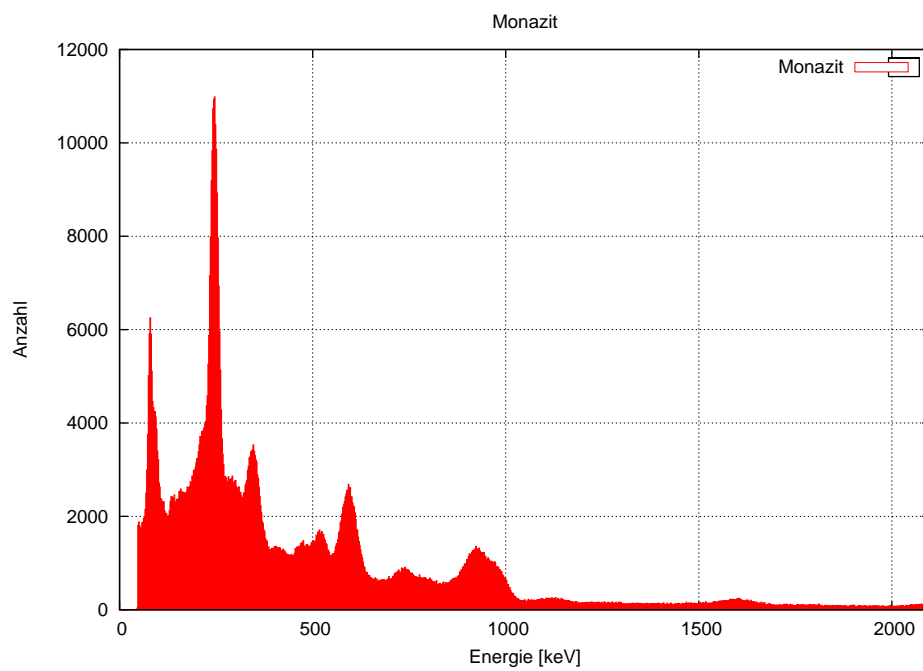
Auswertung

Kalibrierung mit ^{40}K

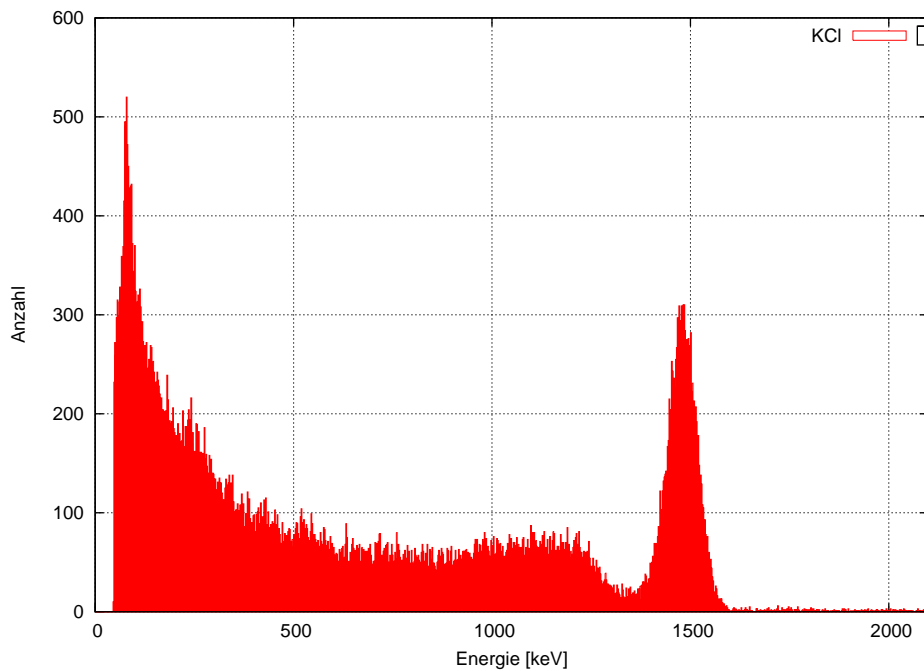


Zur Kalibrierung wurde ein Becher Kaliumchlorid mit der Masse $m=306\text{g}$ gemessen. Das deutliche Peak rechts ist bei $E_K = 1461\text{keV}$ und das nicht so gut zu sehende bei $E_{Tl} = 511\text{keV}$. Der Umrechnungsfaktor zwischen Kanälen und Energien ist $v = 2,088$

Energiebestimmung von Monazit

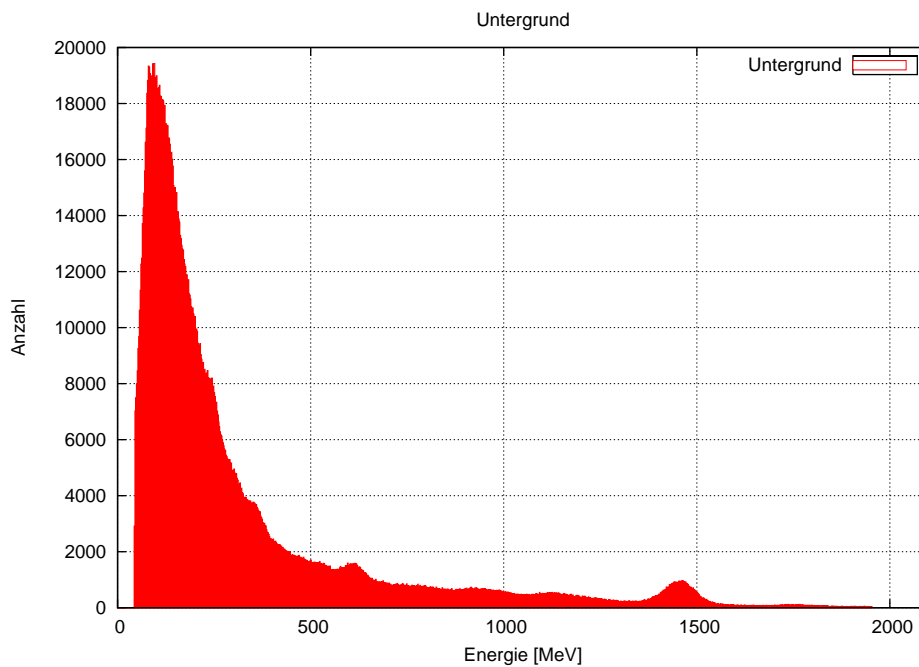


Gemessen	Referenzwert	detektiertes Nuklid
79.43keV	92keV	^{234}Th
244.28keV	239keV	^{212}Pb
344.5keV	352keV	^{214}Pb
597.14keV	583keV	^{208}Tl
922 keV	860keV	^{208}Tl

Aktivitätsbestimmung von ^{40}K 

In 20 Minuten konnten wir 75717 Zerfälle messen, das entspricht 63.1Bq. Allerdings misst der Detektor grob nur $\frac{1}{6}$, geht man von einem Würfel bzw. einem Zylinder mit Höhe=Durchmesser als Messprobe aus. Somit ist die Aktivität schon $A=378.6\text{Bq}$. Nach Nudat wird aber nur in 10.72% aller Fälle ein γ -Quant emittiert, also ist die wirkliche Aktivität **$A=3\ 531.7\text{Bq}$** Die Probe hatte eine Masse von 306g, die molare Masse von KCl ist $\approx 74.5\frac{\text{g}}{\text{mol}}$. Also besteht die Probe aus 4.1mol Teilchen. Davon sind 0.0117% ^{40}K -Teilchen. Bei einer Halbwertszeit von $1.3 \cdot 10^9 \text{a} = 4.04 \cdot 10^{17} \text{s}$ entspricht das einer Aktivität von $A_{theo} = 4968\text{Bq}$. Also hat der Detektor nur 71% der γ -Quanten gemessen.

Dosisabschätzung



Für die Messwerte des Untergrunds musste die Energieskala neu geeicht werden, der ganz rechte Peak entspricht 1461keV

$$m_{NaI} = \rho \cdot V = \rho \pi r^2 h = 1.286 \text{ kg} \quad (10)$$

$$E_{Jahr} = \sum_{i=0}^{1023} N_i \cdot E_i = \frac{782.74 \text{ GeV}}{1.286 \text{ kg}} \cdot \frac{3600 \cdot 24 \cdot 365}{7200 \text{ s}} = 4.2655 \cdot 10^{-4} \text{ J} \quad (11)$$

Umgerechnet auf eine durchschnittliche menschliche Masse von $m=75\text{kg}$ ergibt dies eine Energie von $E_{Mensch} = 0.032\text{J}$ pro Jahr, was einer Äquivalentdosis von $H_{Mensch} = \frac{E_{Mensch}}{75\text{kg}} = 4.27\text{mSv}$ entspricht. Die analoge Rechnung liefert für Monazit die Belastung: $H_{Monazit} = 5.77\text{mSv}$ Wir gehen von einem Bauherrn aus, der im Keller seines auf Monazitsand gebauten Hauses wohnt. Also wirkt die Dosis auf den ganzen Körper.