

# Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene — Teil II

## 2.10 — Umweltradioaktivität

Letzte Änderung: 18. Mai 2010

### Betreuer:

Prof. Dr. A. Müller	Tel.: 15200	e-mail: Alfred.Mueller @iamp.physik.uni-giessen.de
Dr. K. Huber (Teil I)	Tel.: 15070	e-mail: Kurt.Huber @iamp.physik.uni-giessen.de
Gerd Weigand (Teil II)	Tel.: 16600	e-mail: Gerd.Weigand@zbb.uni-giessen.de

## 1 Einführung

Die Bewohner der Erde sind permanent radioaktiver Strahlung ausgesetzt. Diese stammt aus unterschiedlichen Quellen – künstlichen wie natürlichen. Dieser Versuch soll Ihnen eine Vorstellung über das Ausmaß dieser Umweltradioaktivität geben. Im Speziellen werden Sie die natürliche Radioaktivität in einem Gebäude untersuchen sowie die Zerfälle radioaktiver Nuklide im Körper eines/r Praktikanten/in erfassen und spezifizieren. Letzteres wird am Ganzkörperzähler der Hessischen Landesmessstelle für Inkorporationsüberwachung durchgeführt.

## 2 Literatur

- M. Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz  
M. Volkmer, Kernenergie Basiswissen  
<http://www.infokreis-kernenergie.de/informationskreis/de/downloads/downloads.php?navid=85>
- H.-G. Vogt / H. Schultz, Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes, Kap. 3, 4.1, 5, 6, 7
- P. Weish und E. Gruber, Radioaktivität und Umwelt, Kap. 3,4
- Unterrichtung durch die Bundesregierung  
*Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2003*  
<http://www.bfs.de/de/bfs/druck/uus/parlamentsbericht03.pdf>

- G. Musiol, J. Ranft, R. Reif, D. Seeliger, Kern- und Elementarteilchenphysik
- C. M. Lederer, Table of Isotopes
- Handbook of Chemistry and Physics
- Handbücher der verwendeten elektronischen Geräte.
- WWW-Seite des Praktikums Atom- und Quantenphysik,  
<http://www.uni-giessen.de/cms/iamp/lehre/master/mp04>  
 insbesondere „Anleitung zur Fehlerrechnung“.

### 3 Vorbereitung

Berücksichtigen Sie bei Ihrer Vorbereitung folgende Aspekte:

- radioaktive Zerfallsarten
- Einheiten im Strahlenmesswesen
- Ursprünge der natürlichen Radioaktivität (Zerfallsreihen, kosmische Strahlung)
- Zivilisationsbedingte Strahlenbelastung (Röntgenuntersuchungen, ...)
- Abschirmung von Strahlung und ihre Reichweite in Materie
- Funktionsweise von Halbleiterdetektoren bzw. Szintillationsdetektoren

## 4 Teil I: Aufnahme des $\gamma$ -Spektrums der im Praktikumsraum vorhandenen Untergrund-Radioaktivität

### 4.1 Versuchsdurchführung

Bei der verwendeten Elektronik handelt es sich um sogenannte Nuclear-Instrument-Module (NIM). Sie sind in weiten Teilen der Strahlenmesstechnik Standard.

#### 4.1.1 Geräteliste

- 1 hochreiner Ge-Detektor mit ladungsempfindlichem Vorverstärker
- 1 High Voltage Power Supply WENZEL N-DS-250
- 1 Spectroscopy Amplifier mit Vorverstärker Power Supply SILENA 7611
- 1 Analog Digital Converter NUCLEAR DATA 560
- 1 PC zur Spektrenaufnahme
- 1 Oszilloskop

#### 4.1.2 Präparatliste

Vorsicht beim Umgang mit radioaktiven Präparaten! Diese gehören weder in die Taschen von Kleidungsstücken, noch neben das Mittagessen. Nach Gebrauch sind die Hände zu waschen.

- $\gamma$ -Strahler:  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{207}\text{Bi}$ , Kaliumchlorid, verschiedene Alltagsgegenstände.

#### 4.1.3 Einstellung der Elektronik

Damit eine ausreichende Stabilität der Messungen gewährleistet ist, muss das Spektrometer bereits einige Zeit vorher (z.B. 1 Tag) in Betrieb genommen werden. Mit dem Ge-Detektor können wir so die beachtliche Genauigkeit von etwa 0.2keV bei einer Energie von 1MeV erreichen.

Zur passenden Verstärkungseinstellung nutzen wir die 1461 keV Linie von  $^{40}\text{K}$ . Wir verwenden dazu 1kg KCl als Präparat. Natürliches Kalium enthält 0.0117%  $^{40}\text{K}$ .

- Die Hochspannung für den Ge-Detektor ist bereits auf +2600V eingestellt.
- Verbinden Sie den unipolaren Ausgang des Hauptverstärkers mit dem Signal-Eingang des ADC.
- Die Signalverstärkung ist am Hauptverstärker so einzustellen, dass die 1461keV Linie des  $^{40}\text{K}$  etwa bei Kanal 3500 erscheint.
- Als Puls-Shaping-Zeit des Hauptverstärkers ist  $3\mu\text{s}$  einzustellen.
- Stellen Sie „Conversion Gain“ und „Group“ des ADC beide auf 4096 Kanäle.
- Kontrollieren Sie die Hauptverstärkersignale mit dem Oszilloskop.

#### 4.1.4 Aufnahme der $\gamma$ -Spektren

Bei unveränderter Verstärkereinstellung werden nacheinander die Impulshöhenspektren der 5 bekannten  $\gamma$ -Präparate mit Hilfe des PC-Systems und des Programmes **MCA** aufgenommen. Die Messzeiten sind, angepasst an die unterschiedlichen Aktivitäten der Eichpräparate, so zu wählen, dass die für die Eichung relevanten Photo-Peaks eine ausreichende Statistik erreichen. Merke: je länger die Messzeit, umso besser die Eichung.

Führen Sie eine Messung mit einem der radioaktiven Haushaltsgegenständen durch (ca. 20min).

Die Messung des Raumuntergrundes benötigt für eine ausreichende Statistik mindestens einen Tag. Diese Messung wurde je nach Verfügbarkeit des Spektrometers entweder bereits vor Beginn des Praktikums durchgeführt oder sie wird an dessen Ende gestartet.

## 4.2 Auswertung der Messungen

- Fertigen Sie ein Blockschaltbild der verwendeten Elektronik an.
- Führen Sie mit allen eindeutig zu identifizierenden Photo-Peaks eine lineare Energieeichung  $E_\gamma = a + bK$  durch und tragen Sie diese nach Abzug der Eichgeraden grafisch auf.
- Rechnen Sie zur Kontrolle mit Hilfe der Eichung die Eich-Peaks zurück (mit Fehlerfortpflanzungsrechnung) und vergleichen Sie die gemessenen Energien mit den Literaturwerten.
- Plotten Sie die gemessenen Eichspektren als Funktion der  $\gamma$ -Energie.
- Bestimmen Sie die Energien der ca. 20 stärksten Photo-Peaks im Untergrundspektrum und identifizieren Sie mit deren Hilfe die zugehörigen Radionuklide (s. Anhang B). Legen Sie eine Tabelle an:  
Messwert +/- Fehler; Literaturwert; Nuklid
- Vergleichen Sie das Spektrum des Haushaltsartikels mit dem Untergrundspektrum und bestimmen Sie die Energien der Photo-Peaks, die sich deutlich vom Untergrund abheben. Identifizieren Sie wie zuvor die Radionuklide und halten Sie die Ergebnisse in einer Tabelle fest. Bestimmen Sie die Zerfallsreihe, aus der die Radionuklide stammen.
- Beantworten Sie die folgenden Fragen:
  - Wie hoch ist die Strahlenbelastung pro Stunde eines Menschen
    - \* in einem Langstreckenflugzeug (10000 m Höhe),
    - \* in den Alpen (3000 m),
    - \* an der Atlantikküste
  - Geben Sie die Reichweite von  $\beta$ -Strahlung der Energie 0,4 MeV sowie die Achtelwert-Schichtdicke von  $\gamma$ -Strahlung der Energie 1,5 MeV für die folgenden Materialien an:
    - \* Luft
    - \* Wasser

- \* Normalbeton
- \* Eisen
- \* Blei
- Welche effektive Dosis erhält eine Person, die 5 Wochen lang täglich 0,5 l Milch trinkt, die eine Aktivitätskonzentration von  $150 \text{ Bq l}^{-1} \text{ }^{137}\text{Cs}$  aufweist?  
Verwenden Sie zur Lösung die Formeln (10.5) und (10.7) aus dem Buch von H.-G. Vogt und H. Schultz.

## 5 Anleitungen zur Auswertung der Messungen

### 5.1 Energieeichung des Spektrometers

#### 5.1.1 Bestimmung der Peak-Lage mit Gauß-Fit

Die Peaks können zur Bestimmung ihrer Lage recht gut mit einer Gauß-Verteilung gefittet werden. Dabei stellt sich jedoch die Frage, mit welcher Wichtung der Fit durchzuführen ist. Zunächst scheint eine statistische Wichtung ( $W = 1/\text{Kanalinhalt}$ ) angemessen, da die Kanalinhalt Poisson-verteilt sind. Dies hat allerdings zur Folge, dass der Untergrund, der unter Umständen alle möglichen Anteile (z.B. Compton-Kanten) von benachbarten Peaks enthält, erheblich stärker gewichtet wird als der Peak selber. Wir bevorzugen daher einen ungewichteten Fit zur Bestimmung der Peak-Lage.

#### Hinweise:

- Bitte beachten Sie: die Breite des Gauß-Peaks ist nicht die Standardabweichung der Peak-Lage!
- Hinweise für ORIGIN-Benutzer  
Der von ORIGIN angebotene Gauß-Fit kennt nur einen konstanten Untergrund. Dies entspricht nur unzureichend der tatsächlichen Spektrenform. Wir bieten deshalb auf der Praktikums-Internetseite unter den Namen `Gauss_Peak_1_Bg_o75`, `Gauss_Peak_1_Bg_o80`, `Gauss_Peak_2_Bg_o75` und `Gauss_Peak_2_Bg_o80` ORIGIN-fdf-Dateien (Fit-Description-File), für einen einfachen bzw. doppelten Gauß-Peak mit Sigmoid- (Schwanenhals) Untergrund an. Diese Dateien können Sie nach ORIGIN importieren.

Beim Übergang von ORIGIN7.5 nach ORIGIN8 hat der Fitter einige wesentliche Änderungen erfahren, so dass der Fit-Description-File (FDF) angepasst werden musste. Leider stehen zur Zeit unter ORIGIN8 aber auch einige Funktionen zur Einstellung des Fitters über die FDF-Datei nicht zur Verfügung und müssen deshalb von Hand vorgenommen werden. Alternativ kann unter ORIGIN8 der alte Fitter-Dialog verwendet werden, der aber ziemlich langsam läuft.

- **Origin7.5**  
Importieren Sie `Gauss_Peak_1/2_Bg_o75`:  
→ Non linear Curve Fit  
→ Advanced Fitting Tool → Category → New (z.B. Praktikum)

→ **Function** → **Select** → **Praktikum**

→ **Function** → **Add** (**Gauss\_Peak\_1/2\_Bg\_o75**)

Zum Fitten der Messdaten stellen Sie die Spektren grafisch dar und starten den Fit über

→ **Analysis**

→ **Non linear Curve Fit**

→ **Advanced Fitting Tool**

→ **Function** → **Select** → **Praktikum** → **Gauss\_Peak\_1/2\_Bg\_o75**

Dann markieren Sie in der Grafik Anfang und Ende des Fit-Bereiches mit den zwei Markern und übernehmen die Markierung in das Fit-Modul mit

→ **Action** → **Reset Fitter**

Starten Sie anschließend die Startwertberechnung mit

→ **Action** → **Fit**

wodurch innerhalb der Markierungen der durch die Startwerte angenäherte Kurvenverlauf gezeichnet wird. Ist dieser zufrieden stellend, so können Sie mit dem Fit beginnen, ansonsten ist eventuell eine Korrektur der Startwerte notwendig.

Der Fit wird ungewichtet durchgeführt. Über

→ **Options** → **Control**

kann diese Vorbelegung jedoch umgangen werden. Wenn Sie statistische Wichtung verwenden, so sollten Sie aber **Scale Errors with sqrt(reduced  $\chi^2$ )** aktivieren, um bei der Fehlerrechnung die Streuung der Messwerte um die Fit-Kurve zu berücksichtigen.

Der Parameter **TEST** darf für den Fit nicht frei gegeben werden und muss null sein. Er erlaubt das Zeichnen der einzelnen Kurvenanteile mit der Kurvensimulationsfunktion

→ **Action** → **Simulate**

Mögliche Werte für **TEST** für **Gauss\_Peak\_1/2\_Bg\_o75**:

0/0: komplette Kurve

1/1: nur Peak 1

-/2: nur Peak 2

2/3: nur Untergrund

#### – **Origin8 mit altem Fitter-Dialog**

Starten Sie den alten Fitter-Dialog in dem Sie über das Command- oder das Script-Window **nlsf.control()** eingeben. Dann verfahren Sie wie unter **ORIGIN7.5**. Der alte Fitter benötigt unter **ORIGIN8** deutlich mehr Zeit. **ORIGINLAB** arbeitet an diesem Problem.

#### – **Origin8 mit neuem Fitter-Dialog**

Importieren Sie **Gauss\_Peak\_1/2\_Bg\_o80**:

→ **Tools**

→ **Fitting Function Organizer**

→ **New Category** (z.B. **Praktikum**)

→ Add (Gauss\_Peak\_1/2\_Bg\_o80)

Zum Fitten der Messdaten stellen Sie die X-Y-Werte grafisch dar. Dann markieren Sie in der Grafik Anfang und Ende des Fit-Bereiches mit den zwei Markern und starten den Fit über

→ Analysis

→ Fitting

→ Nonlinear Curve Fit

→ Open Dialog

→ Settings

→ Function Selection

→ Category (Praktikum) → Function (Gauss\_Peak\_1/2\_Bg\_o80)

Mit Auswahl der Fitfunktion wird die automatische Startwertfindung durchlaufen und in einem Attention-Fenster und im Script-Fenster wird darauf hingewiesen, dass unter ORIGIN8 einige Fitter-Einstellungen zur Zeit (ORIGINLAB arbeitet an diesem Problem) manuell vorgenommen werden müssen um ein korrektes Ergebnis zu erhalten. Die Startwertkurve wird in die Grafik eingezeichnet. Sie sollte bereits recht gut passen, so dass der Fit problemlos ablaufen kann.

### 5.1.2 Energieeichung mit Geraden-Fit

Zur Energieeichung verwenden Sie die zuvor ermittelten Kanallagen der Peaks und die aus den Zerfallsschemata zu entnehmenden zugehörigen Energien für einen linearen Fit. Für die Literaturwerte der Energien können wir die Fehler vernachlässigen. Die Peak-Lagen sind mit Fehlern behaftet, die uns der Gauß-Fit geliefert hat. Da die Fehler der Peak-Lagen sehr unterschiedlichen sein können, je nach dem wie gut die Peaks zu fitten sind, sollten wir für die Energieeichung einen gewichteten Fit verwenden. Um die Fehler berücksichtigen zu können, wählen wir die Peak-Lage  $K$  als abhängige Variable und die Energie als unabhängige.

$$K = a + b E \quad (1)$$

Stellen Sie die Eichpunkte nach Abzug der Eichgeraden mit Fehlerbalken grafisch dar (vgl. Abb. 1). Falls es „Ausreißer“ gibt suchen Sie nach der Ursache (z.B. Tippfehler).

Rechnen Sie zur Kontrolle die Messwerte mit Hilfe der Eichung zurück (mit Fehlerrechnung) und vergleichen Sie diese in einer Tabelle (Kanal  $\pm \Delta$ Kanal; Energie  $\pm \Delta$ Energie; Literaturwert) mit den Literaturwerten.

Hinweise:

- Beim ungewichteten Fit ergeben sich die Fehler der Geradenparameter mittels der reduzierten Fehlerquadratsumme (red.  $\chi^2$ ) aus der Streuung der Messwerte um die Fit-Gerade. Beim gewichteten Fit hingegen ergeben sich die Fehler der Geradenparameter durch Fehlerfortpflanzung aus den Fehlern der Messwerte. Da die Peak-Fits mit Gauß-Kurven gewöhnlich Fehler liefern, die deutlich zu klein sind, ist es eine gute Idee, auch beim gewichteten Fit die Parameterfehler mit der Wurzel aus der reduzierten Fehlerquadratsumme zu multiplizieren. Wenn bei einem gewichteten Fit statistisch alles in Ordnung ist, so ist die reduzierte Fehlerquadratsumme ohnehin 1, und unsere Korrektur hat keine Auswirkung auf die Fehler.

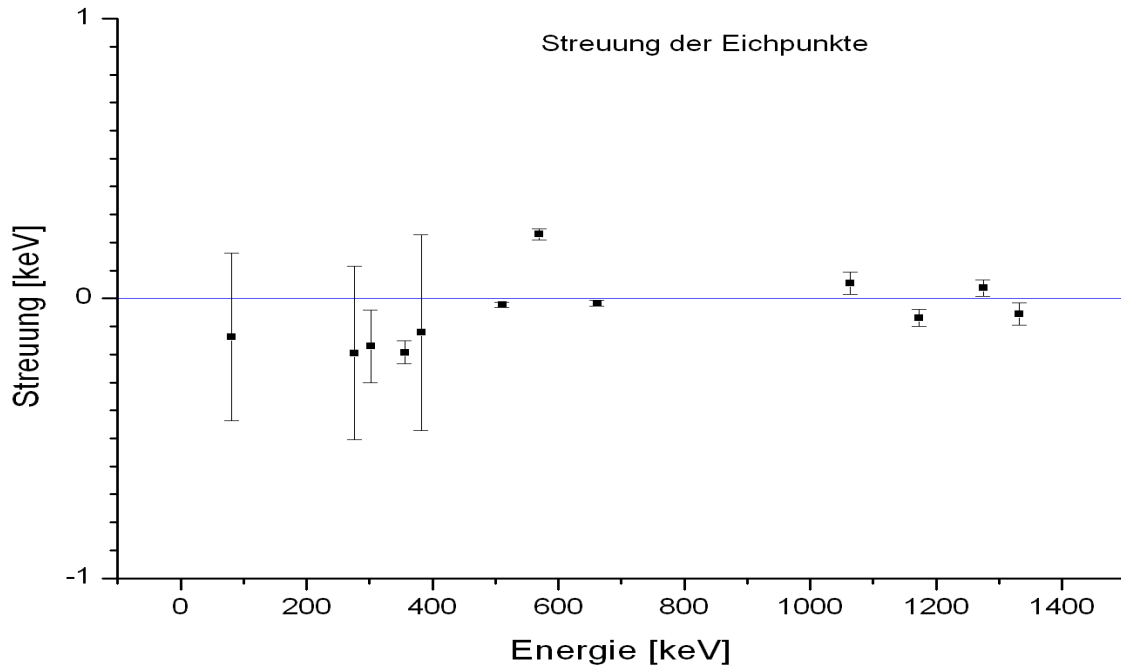


Abbildung 1:

ORIGIN bietet diese Möglichkeit an über

→ Options → Control → Scale Errors with `sqrt(reduced  $\chi^2$ )`

- Da wir mit unserem Gamma-Spektrometer Energien von 1 MeV mit einer Genauigkeit von ca. 0.2 keV messen können, ist unbedingt darauf zu achten, dass bei den Rechnungen ausreichend Dezimalstellen berücksichtigt werden!

## 5.2 Fehlerrechnung

In die Fehlerrechnung für die Energie gehen sowohl die Fehler  $\Delta a$  und  $\Delta b$  der Energieeichung (Gl. 1) als auch der Fehler  $\Delta K$  der Peak-Lage ein. Wir setzen voraus, dass die einzelnen Beiträge statistisch unkorreliert sind, d.h. dass die Kovarianzen null sind, und addieren die Beiträge quadratisch. Für  $a$  und  $b$  würde dies nur zutreffen wenn wir den Energienullpunkt vor dem Geraden-Fit in den Schwerpunkt der Messwerte gelegt hätten (siehe „Anleitung zur Fehlerrechnung“). Die Fehlerfortpflanzung rechnet sich dann folgendermaßen:

$$K = a + b E \quad (2)$$

$$E = (K - a)/b \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial K} \Delta K\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{b} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{E}{b} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{1}{b} \Delta K\right)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Die Fehler, die wir erhalten, sind Standardabweichungen  $\sigma$ , d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass unsere Messwerte innerhalb der Fehlergrenzen liegen sind für



$1\sigma$ : 68%  
 $2\sigma$ : 95%  
 $3\sigma$ : 99%

## 6 Teil II: Messung der Ganzkörperaktivität eines Menschen

Jedes Lebewesen, ob Pflanze, Tier oder Mensch enthält im Gewebe radioaktive Nuklide. Im Ganzkörperzähler kann die aus dem Gewebe emittierte  $\gamma$ -Strahlung erfasst werden.

Es handelt sich im wesentlichen um einen Demonstrationsversuch, bei dem gezeigt wird, wie die Inkorporationsüberwachung von Personen durchgeführt wird, bei denen eine Inkorporation radioaktiver Nuklide nicht auszuschließen ist. Gleichzeitig zeigt die Messung die Konzentration der im Körper befindlichen natürlichen  $\gamma$ -Strahlung emittierenden Isotope.

Für diesen Teil des Versuches Umweltradioaktivität findet man gute Informationen in den Kapiteln 7, 8 und 9 der in der Literaturzusammenstellung aufgeführten Broschüre von M. Volkmer, *Radioaktivität und Strahlenschutz*.

### 6.1 Fragen

- Wie hoch ist die Aktivität eines "Normmenschen"?
- Welches sind die wesentlichen natürlichen radioaktiven Isotope im Körper eines Menschen?
- Wie funktioniert die Radio-Carbon-Messung zur Altersbestimmung?
- Können wir den radioaktiven Kohlenstoff mit dem Ganzkörperzähler nachweisen?
- Welches radioaktive Isotop wird als Folge der Kernwaffenversuche und dem Reaktorunfall in Tschernobyl auch heute noch inkorporiert? War bei Ihnen ein Nachweis positiv?

### 6.2 Versuchsdurchführung

Der Ganzkörperzähler ist bereits vor Versuchsbeginn kalibriert worden und der Untergrund wurde ausgemessen. Die Messung wird vom Betreuer durchgeführt. Sie dauert 20 Minuten und kann bei ausreichender Zeit und Interesse für jeden Praktikumsteilnehmer durchgeführt werden.

### 6.3 Auswertung der Messung

- Bestimmen Sie die spezifische  $^{40}\text{K}$ -Aktivität der Probanden.
- Bestimmen Sie die Kalium-Gesamtmasse der Probanden.

- Vergleichen Sie die Kalium-Gesamtmasse mit dem Normwert. Da Kalium im Wesentlichen in den Muskeln eingelagert ist, verrät dieser Vergleich einiges über die sportliche Fitness des Probanden.

Der Normwert für Männer rechnet sich nach der Formel:

$$M_K[\text{g}] = (2.38658 - 0.00893 * [\text{Alter in Jahren}]) * [\text{Probandenmasse in kg}]$$

Der Normwert für Frauen rechnet sich nach der Formel:

$$M_K[\text{g}] = (1.9383 - 0.00675 * [\text{Alter in Jahren}]) * [\text{Probandenmasse in kg}]$$

- Überlegen Sie sich, welche Parameter zu berücksichtigen sind, um aus der Messung der Zählraten der 4 NaJ(Tl)-Detektoren die Dosis zu ermitteln, die durch die im menschlichen Körper inkorporierten Nuklide verursacht wird.

## A Niveauschemata

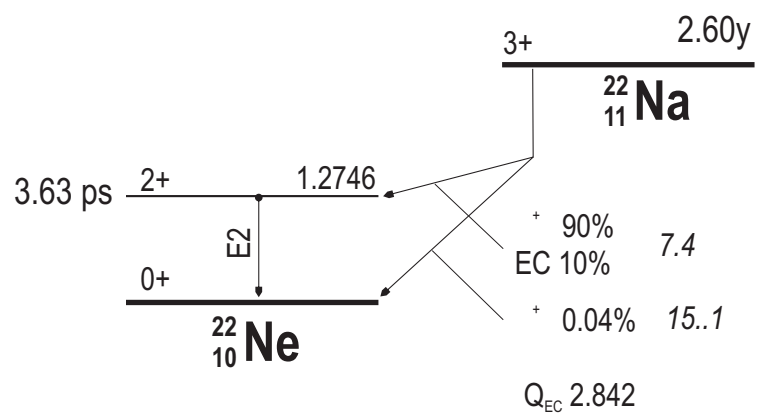


Abbildung 2: Niveauschema zum  $^{22}\text{Na}$ -Präparat.

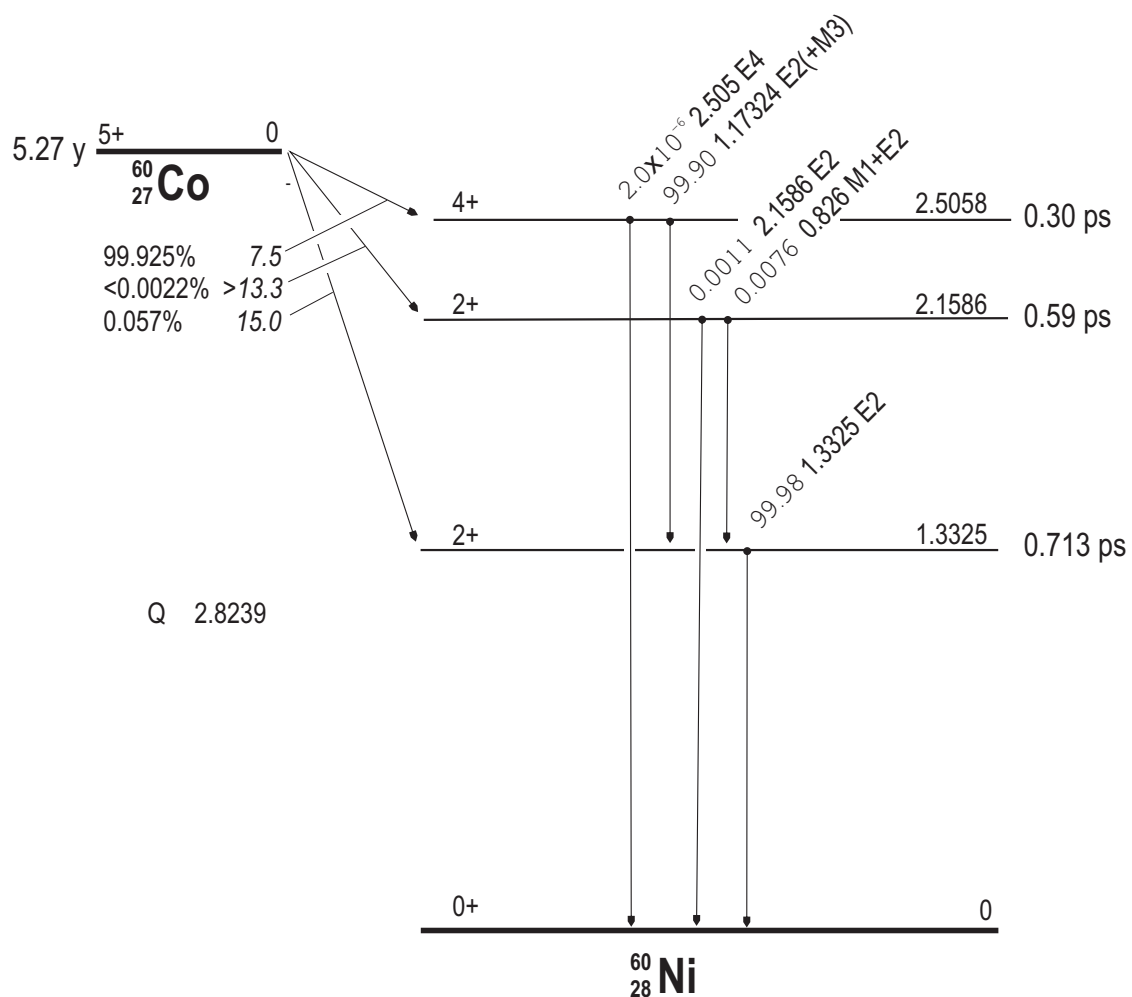


Abbildung 3: Niveauschema zum  $^{60}\text{Co}$ -Präparat.



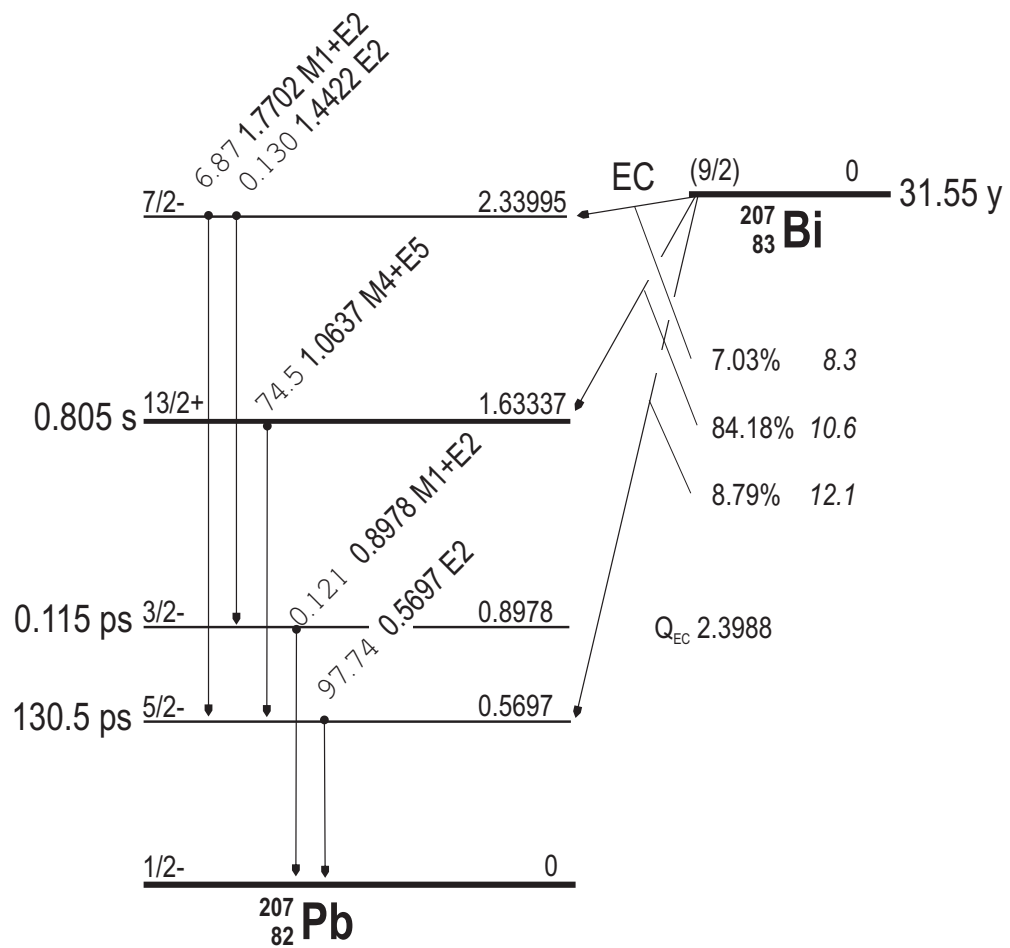


Abbildung 6: Niveauschema zum  $^{207}\text{Bi}$ -Präparat.

## B Gammaenergien

$E_\gamma$ (keV)	Isotop
74.815	$^{212,214}\text{Pb}$
74.969	$^{208}\text{Tl}$
77.108	$^{212,214}\text{Pb}$
83.780	$^{226}\text{Ra}$
84.371	$^{228}\text{Th}$
87.300	$^{212}\text{Pb}$
186.210	$^{226}\text{Ra}$
209.280	$^{228}\text{Ac}$
238.630	$^{212}\text{Pb}$
240.980	$^{224}\text{Ra}$
241.980	$^{214}\text{Pb}$
270.230	$^{228}\text{Ac}$
277.350	$^{208}\text{Tl}$
295.210	$^{214}\text{Pb}$
300.090	$^{212}\text{Pb}$
327.640	$^{228}\text{Ac}$
327.960	$^{212}\text{Bi}$
338.320	$^{228}\text{Ac}$
351.920	$^{214}\text{Pb}$
463.000	$^{228}\text{Ac}$
510.840	$^{208}\text{Tl}$
583.140	$^{208}\text{Tl}$
609.310	$^{214}\text{Bi}$
727.170	$^{212}\text{Bi}$
768.360	$^{214}\text{Bi}$
785.460	$^{212}\text{Bi}$
794.700	$^{228}\text{Ac}$
835.500	$^{228}\text{Ac}$
860.370	$^{208}\text{Tl}$
911.070	$^{228}\text{Ac}$
934.060	$^{214}\text{Bi}$
964.600	$^{228}\text{Ac}$
969.110	$^{228}\text{Ac}$
1120.300	$^{214}\text{Bi}$
1238.100	$^{214}\text{Bi}$
1377.700	$^{214}\text{Bi}$
1460.800	$^{40}\text{K}$

Tabelle 1:  $\gamma$ -Energien einiger Isotope aus den natürlichen Zerfallsreihen.