

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene — Teil II

Leihgesterner Weg 217 (Strahlenzentrum), Raum 14

2.10 — Umweltradioaktivität

Letzte Änderung: 6. April 2016

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.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbereitung	3
1.1	Literatur	3
1.2	Fragen	3
2	Teil I: Aufnahme des γ-Spektrums der im Praktikumsraum vorhandenen Untergrund-Radioaktivität und eines Haushaltsartikels	4
2.1	Versuchsdurchführung	4
2.1.1	Geräteliste	4
2.1.2	Präparateliste	4
2.1.3	Einstellung der Elektronik	4
2.1.4	Aufnahme der γ -Spektren	5
2.2	Aufgaben	5
2.3	Auswertung der Messungen	6
2.3.1	Energieeichung des Spektrometers	6
2.3.1.1	Bestimmung der Peak-Lage mit Gauß-Fit	6
2.3.1.2	Energieeichung mit Geraden-Fit	6
2.3.2	Fehlerrechnung	7

3	Teil II: Messung der Ganzkörperaktivität eines Menschen	8
3.1	Fragen	8
3.2	Versuchsdurchführung	9
3.3	Aufgaben	9
3.4	Hinweise für ORIGIN-Benutzer	9
3.4.1	Zur Verfügung gestellte Fit-Funktionen	9
3.4.1.1	Gauss_Peak_1_Bg	9
3.4.1.2	Gauss_Peak_2_Bg	9
3.4.2	Importierung und Anwendung der Fit-Funktionen	10
3.4.2.1	ORIGIN7.5	10
3.4.2.2	ORIGIN8 mit altem Fitter-Dialog	11
3.4.2.3	ORIGIN8 mit neuem Fitter-Dialog	11
3.4.3	Fitter-Einstellungen für die lineare Energieeichung	11
A	Niveauschemata	12
B	Gammaenergien	15

1 Vorbereitung

1.1 Literatur

- M. Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz
<http://www.kernfragen.de/kernfragen/documentpool/013radioaktivitaet-u-strahlensch.pdf>
M. Volkmer, Kernenergie Basiswissen
<http://www.kernfragen.de/kernfragen/documentpool/018basiswissen2007.pdf>
- 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 2010
<http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-201205118217>
- 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/physik/mp04>
insbesondere „Anleitung zur Fehlerrechnung“.

1.2 Fragen

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

2 Teil I: Aufnahme des γ -Spektrums der im Praktikumsraum vorhandenen Untergrund-Radioaktivität und eines Haushaltsartikels

2.1 Versuchsdurchführung

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

2.1.1 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 SILENA 7411
- 1 PC zur Spektrenaufnahme
- 1 Oszilloskop

2.1.2 Präparateliste

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.

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

2.1.3 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}K . Wir verwenden dazu 1kg KCl als Präparat. Natürliches Kalium enthält 0.0117% ^{40}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}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.

2.1.4 Aufnahme der γ -Spektren

Bei unveränderter Verstärkereinstellung werden nacheinander die Impulshöhenspektren der 5 bekannten γ -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.

2.2 Aufgaben

- 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 γ -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 β -Strahlung der Energie 0,4 MeV sowie die Achtelwert-Schichtdicke von γ -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 (10.6) und (10.8) aus dem Buch von H.-G. Vogt und H. Schultz (4. Auflage). [In den früheren Auflagen sind dies die Gleichungsnummern (10.5) und (10.7)]

2.3 Auswertung der Messungen

2.3.1 Energieeichung des Spektrometers

2.3.1.1 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.

Oft verwechselt:

Die Breite des Gauß-Peaks ist nicht die Standardabweichung der Peak-Lage!

Hinweis 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 (s. Abschnitt 1.1) unter den Namen **Gauss_Peak_1_Bg**, und **Gauss_Peak_2_Bg** ORIGIN-**fdf**-Dateien (Fit-Description-Files) für einen einfachen bzw. doppelten Gauß-Peak mit Sigmoid- (Schwanenhals) Untergrund an. Diese Dateien können Sie nach ORIGIN importieren (s. Abschnitt 3.4).

2.3.1.2 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).

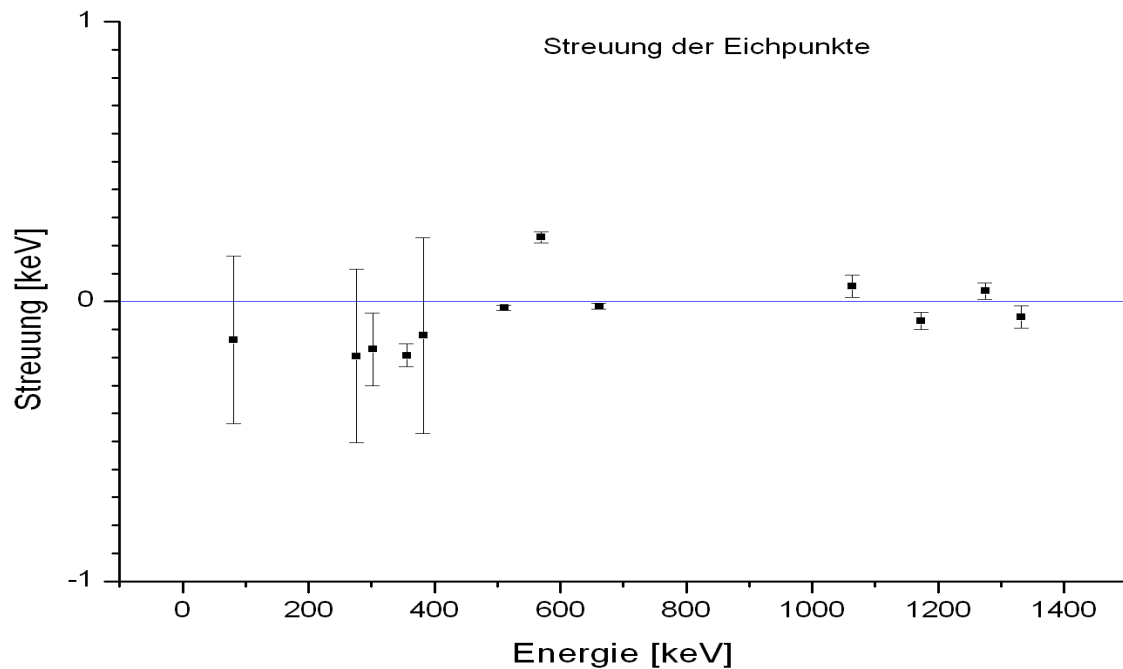


Abbildung 1: Residuen der linearen Energieeichung

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

Hinweise:

- Beim ungewichteten Fit ergeben sich die Fehler der Geradenparameter mittels der reduzierten Fehlerquadratsumme (red. χ^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.
- 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!

2.3.2 Fehlerrechnung

Eine brauchbare Identifizierung der Radionuklide ist nur möglich mit einer ordentlichen Fehlerrechnung. In die Fehlerrechnung für die Energie gehen sowohl die Fehler Δa und Δb der Energieeichung (Gl. 1) als auch der Fehler ΔK 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“, Abschnitt 1.1). 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 σ , d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass unsere Messwerte innerhalb der Fehlergrenzen liegen sind für

1σ : 68%

2σ : 95%

3σ : 99%

3 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 γ -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 γ -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*.

3.1 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?

3.2 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 Praktikumssteilnehmer durchgeführt werden.

3.3 Aufgaben

- Bestimmen Sie die spezifische ^{40}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 vier NaJ(Tl)-Detektoren die Dosis zu ermitteln, die durch die im menschlichen Körper inkorporierten Nuklide verursacht wird.

3.4 Hinweise für Origin-Benutzer

3.4.1 Zur Verfügung gestellte Fit-Funktionen

Auf der Internetseite des Praktikums (s. Abschnitt 1.1) stehen folgende ORIGIN-fdf-Dateien (Fit Description Files) für Ihre Auswertungen bereit (s. Abschnitt 2.3.1.1):

3.4.1.1 Gauss_Peak_1_Bg .

Fitfunktion für Einfach-Gauß-Peak mit Sigmoide-Untergrund.

3.4.1.2 Gauss_Peak_2_Bg .

Fitfunktion für zwei benachbarte Gauß-Peaks mit Sigmoide-Untergrund.

Die Fits werden ungewichtet durchgeführt. Diese Vorbelegung kann jedoch mit folgender Einstellung im Fitter-Dialog-Fenster umgangen werden:

→ Options → Control → Weighting Method (ORIGIN7.5)

→ Settings → Data Selection → Weights (ORIGIN8)

Wenn Sie statistische Wichtung verwenden, so sollten Sie aber

→ Scale Errors with sqrt(reduced χ^2) (ORIGIN7.5)

→ Settings → Advanced → Use Reduced Chi-Sqr (ORIGIN8)

aktivieren, um bei der Fehlerrechnung die Streuung der Messwerte um die Fit-Kurve zu berücksichtigen.

Im Script-Fenster werden als abgeleitete Parameter Fläche und Halbwertsbreite der Peaks und deren Fehler ausgegeben.

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.

Mögliche Werte für TEST für Gauss_Peak_1/2_Bg:

- TEST=0/0: komplette Kurve
- TEST=1/1: nur Peak 1
- TEST=-/2: nur Peak 2
- TEST=2/3: nur Untergrund

3.4.2 Importierung und Anwendung der Fit-Funktionen

Beim Übergang von ORIGIN7.5 nach ORIGIN8 hat der Fitter einige wesentliche Änderungen erfahren, so dass die Fit-Description-Files (FDF) angepasst werden mussten. Leider stehen zur Zeit unter ORIGIN8 aber auch einige Funktionen zur programmierten 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.

3.4.2.1 Origin7.5

Importieren Sie Gauss_Peak_1/2_Bg_o75:

- Analysis
- 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 X-Y-Werte 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. Anschließend lassen Sie den Fit iterieren.

3.4.2.2 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.

3.4.2.3 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.

3.4.3 Fitter-Einstellungen für die lineare Energieeichung

Für die Energieeichung stehen drei Spalten zur Verfügung: X, Y und ΔY , wobei letztere als Y-Fehler mittels "Set As" gekennzeichnet werden muss.

ORIGIN7.5:

- Analysis → non-linear Curve Fit → Advanced Fitting Tool
 - Function → Select → Polynomial → Line
 - Options → Control → Weighting Method: instrumental,
Scale Errors with $\sqrt{\text{reduced } \chi^2}$

ORIGIN8:

- Analysis → Fitting → Nonlinear Curve Fit → Open Dialog
 - Settings → Function Selection → Category: Polynomial → Line
 - Settings → Data Selection → Weights: Instrumental
 - Settings → Advanced → Use Reduced Chi-Sqr

A Niveauschemata

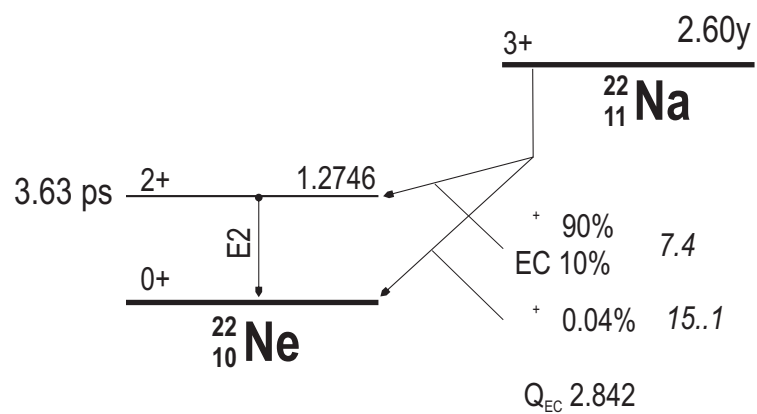


Abbildung 2: Niveauschema zum ^{22}Na -Präparat.

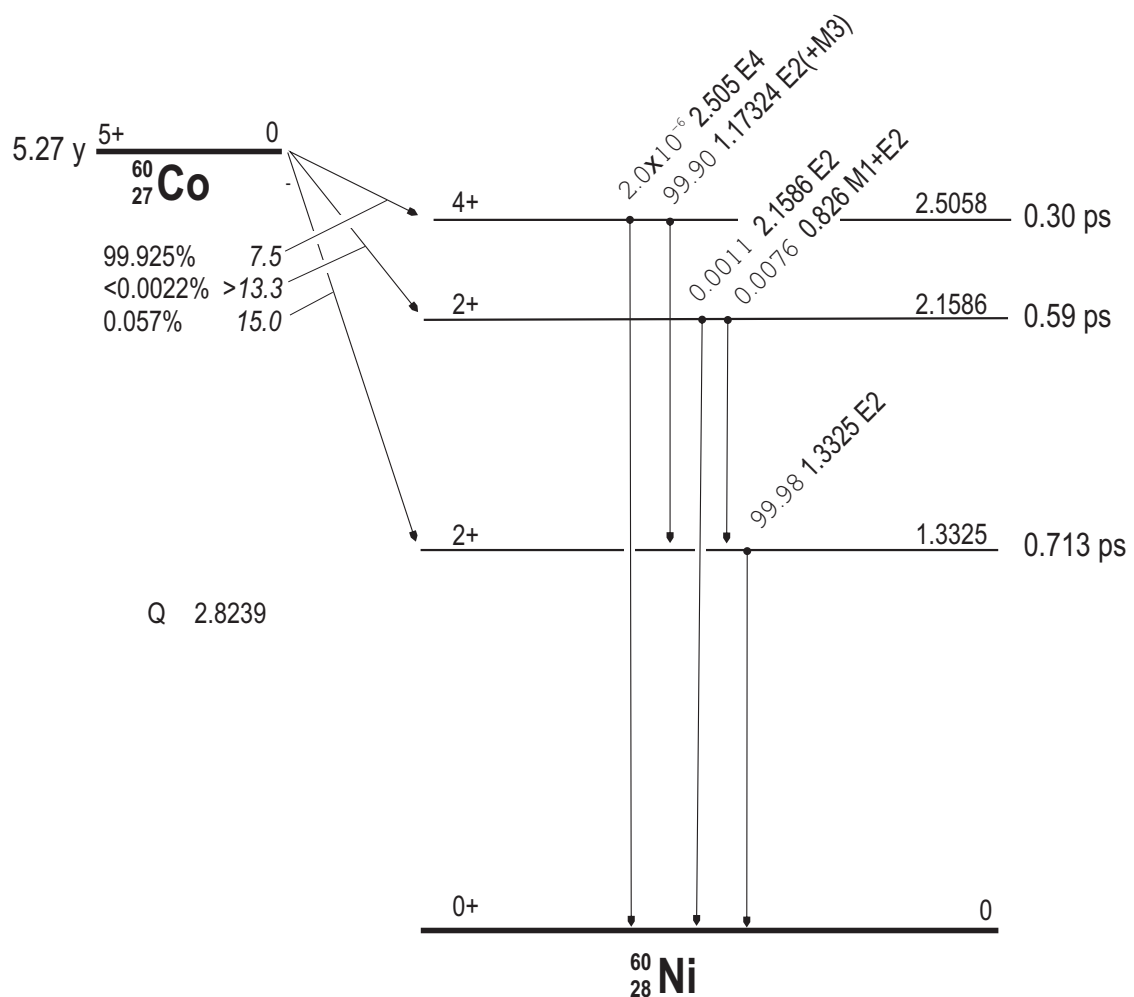


Abbildung 3: Niveauschema zum ^{60}Co -Präparat.

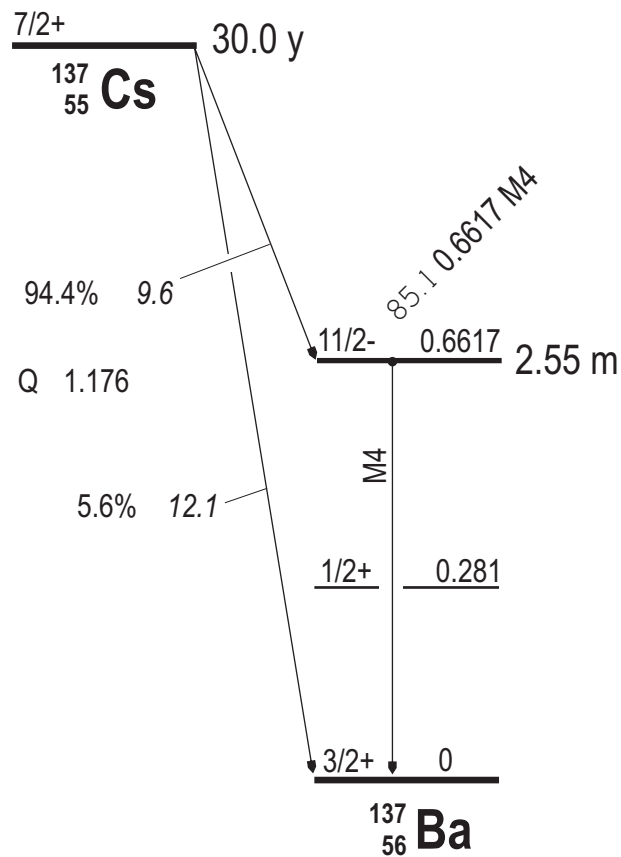


Abbildung 4: Niveauschema zum ^{137}Cs -Präparat.

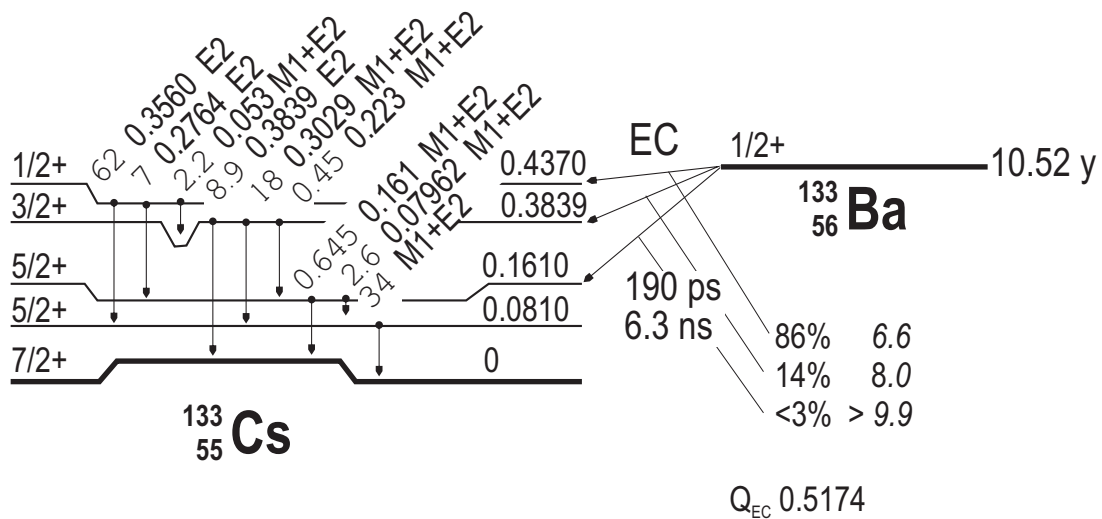


Abbildung 5: Niveauschema zum ^{133}Ba -Präparat.

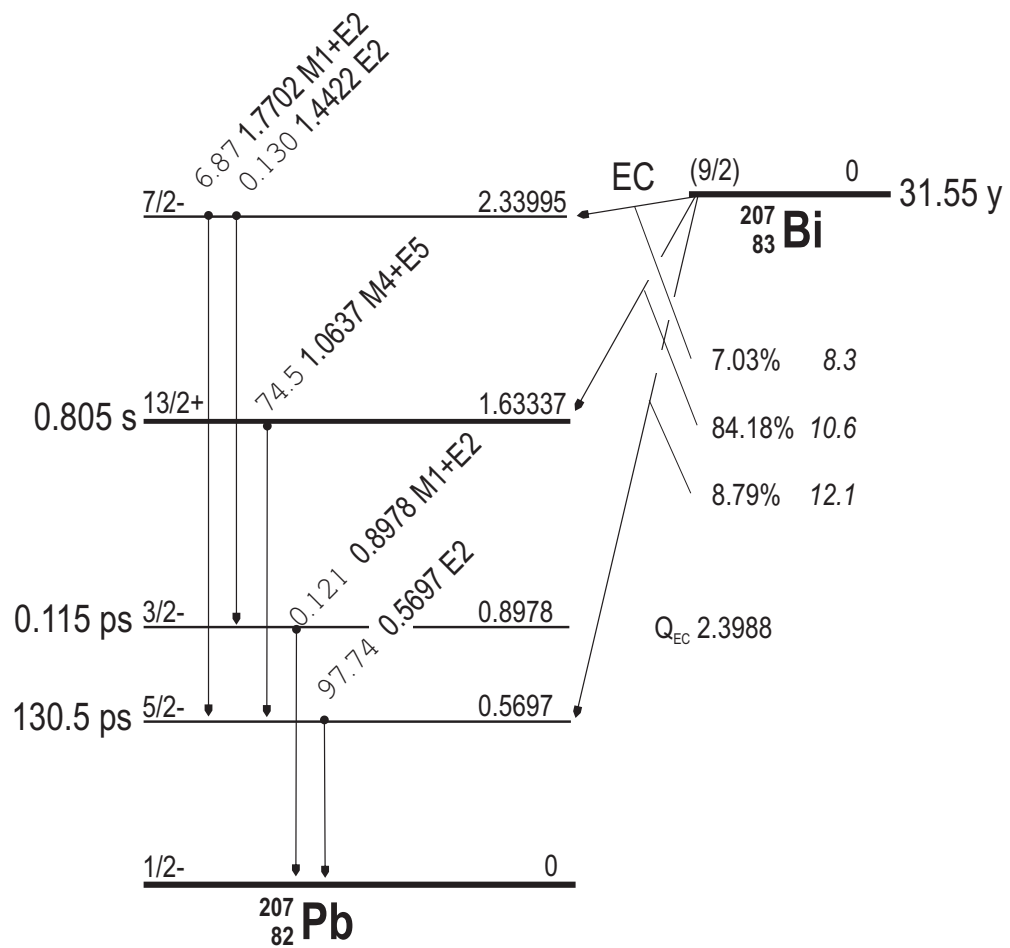


Abbildung 6: Niveauschema zum ^{207}Bi -Präparat.

B Gammaenergien

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

Tabelle 1: γ -Energien einiger Isotope aus den natürlichen Zerfallsreihen.