

Beta-Spektrometrie

Klaus Steiniger, Alexander Wagner, Gruppe 850

klaus.steiniger@physik.tu-dresden.de, alexander.wagner@physik.tu-dresden.de

Betreuer: Herr A. Jahn

Protokoll vom 9. April 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Durchführung	2
2.1	Aufgabenstellung	2
2.2	Versuch	2
3	Auswertung	3
3.1	Cäsium	3
3.2	Krypton	5
3.3	Absorption	7
4	Ergebnis und abschließende Diskussion	9

1 Einleitung

In diesem Versuch untersuchten wir den Beta-Zerfall der Isotope ^{137}Cs und ^{85}Kr , indem wir die Energie der entstandenen Elektronen untersucht haben. Der Beta-Zerfall wird im (aktuellen) Elementarteilchen-Modell so erklärt, dass ein Neutron (udd) unter Aussendung eines Elektrons und Antineutrinos in ein Proton (uud) zerfällt.

Der Cäsium-137-Kern zerfällt zu 5,6 % in einen stabilen Barium-137-Kern und zu 94,4 % in einen metastabilen. Letzterer erreicht den stabilen Zustand durch Aussendung eines Photons der Energie 661,7 keV, welches Konversionselektronen aus der Atomhülle ausschlagen kann. Da die Wahrscheinlichkeit für den Zerfall über den metastabilen Zustand sehr hoch ist, werden auch die Konversionselektronen einen erheblichen Anteil an der ausgesendeten Beta-Strahlung darstellen. Aus der K-Schale ausgeschlagene Elektronen besitzen eine Energie von $E_{e,K} = E_\gamma - E_K = 624,2 \text{ keV}$ und L-Elektronen eine Energie von $E_{e,L} = 655,7 \text{ keV}$.

Der Krypton-85-Kern zerfällt mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,6 % direkt in den stabilen Rubidium-85-Kern, die Aussendung von Konversionselektronen ist also unerheblich und macht sich in unserem Versuch nicht bemerkbar.

2 Durchführung

2.1 Aufgabenstellung

1. Aufnahme und Diskussion des Gamma-Untergrundes der Zerfälle von Cs-137 und Kr-85
2. Aufnahme und Diskussion der Beta-Spektren von Cs-137 und Kr-85
3. Energiekalibrierung und Bestimmung des Auflösungsvermögens des Spektrometers mit Hilfe der Konversionselektronen aus dem Zerfall von Ba-137m
4. Bestimmung der Grenzenergien der Beta-Zerfälle von Cs-137 und Kr-85 mit Hilfe eines Fermi-Plots
5. Untersuchung der Wechselwirkung von Beta-Strahlung mit Materie

2.2 Versuch

Wir überprüften die Biasspannung, die wir auf 60 V konstant hielten. In der Probenkammer befand sich bereits das Krypton-Präparat, welches wir also als erstes analysierten. Da der SiHLD auch Photonen registriert, mussten wir im ersten Schritt den Gamma-Untergrund vermessen. Dazu deckten wir die radioaktive Probe mit einer ca. 3 mm dicken Aluminium-Platte ab, denn Beta-Strahlung wird bereits von wenigen mm Material nahezu vollständig absorbiert. Die Photonen werden durch den Compton-Effekt in der Platte abgelenkt und schlagen Elektronen raus, die der HLD detektieren kann. Innerhalb von 5 Minuten Messzeit nahm das dort vorliegende Programm das Untergrundspektrum auf. Bei den weiteren Messungen für Krypton hielten wir uns an eine Messzeit von 2 Minuten; wir nahmen jeweils das Spektrum für 0-4 Papierblätter und für 3,6,9, und 12 Alu-Blätter zwischen Quelle und Detektor auf.

Nun wechselten wir die Probe aus und nahmen die Spektren von Cäsium auf, 10 Minuten für den Untergrund und jeweils 5 Minuten für die restlichen Messungen.

3 Auswertung

3.1 Cäsium

Das Untergrundspektrum ergab einen deutlichen Peak innerhalb der ersten 20 Kanäle, in höheren Kanälen traten kaum Ereignisse auf. In folgender Grafik ist der Untergrund logarithmisch dargestellt:

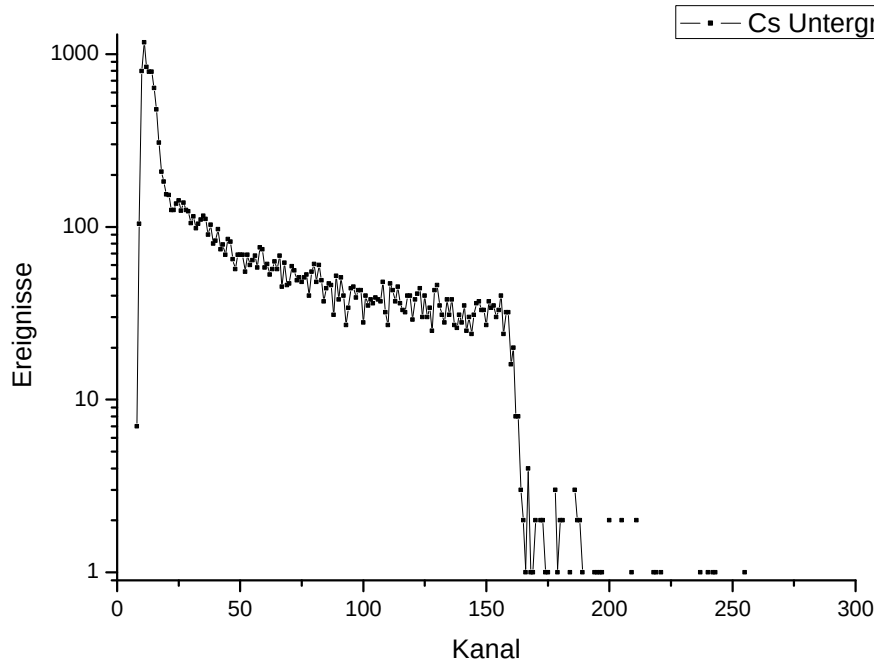


Abbildung 1: Gamma-Untergrund von Cäsium

Deutlich zu erkennen ist das Compton-Kontinuum, welches bei Kanal 160 mit der sog. Compton-Kante endet. Diese wiederum gibt uns die Maximalenergie der Elektronen zu $E_{max} = 488 \text{ keV}$ (s. Kalibrierung). Theoretisch müsste sich die maximale Energie nach folgender Formel ergeben:

$$E_{max} = \frac{2E_\gamma^2/m}{1 + 2E_\gamma/m} = 477 \text{ keV}.$$

Hierbei ist $E_\gamma = 661,7 \text{ keV}$ die Energie der Photonen, die beim Übergang aus dem metastabilen Zustand entstehen. Die Abweichung zwischen Theorie und Praxis sind hier sehr gering, weniger als 3%.

Nach Abzug des Untergrunds ergab sich für unser Cäsium-Isotop folgendes Spektrum: Die auf der oberen Achse eingetragenen Energien ergeben sich aus der Kalibriergerade (s. unten). Deutlich erkennt man die Peaks der Konversionselektronen bei hohen Energien. Da diese Elektronen eine wohl definierte Energie (s. Einleitung) besitzen, lässt sich an ihnen zum Einen die Kalibrierung unserer Messeinrichtung vornehmen, zum Anderen können wir auch Aussagen über das Auflösungsvermögen des Spektrometers treffen. Für letzteres haben wir in Origin über die Konversionspeaks einen Gauß-Fit gelegt und die Halbwertsbreite (FWHM) abgelesen.

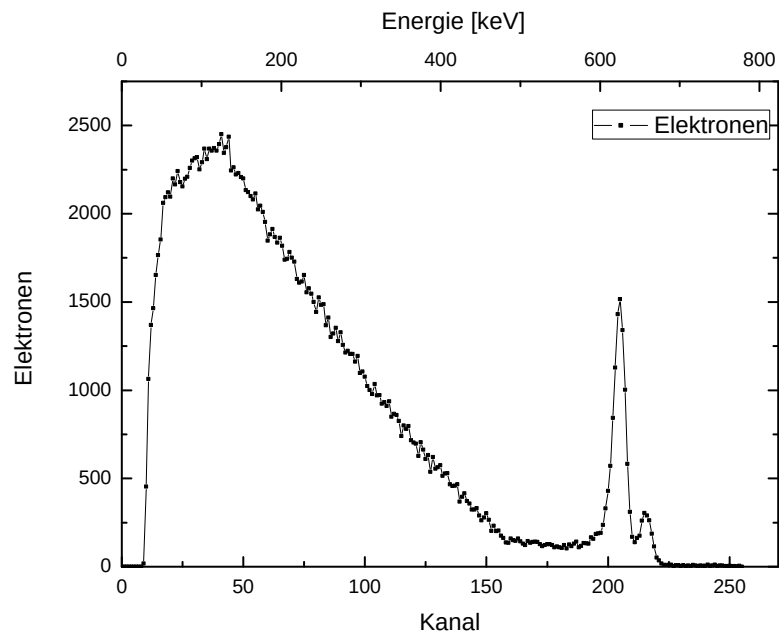


Abbildung 2: Spektrum der Beta-Elektronen von Cäsium

Beim ersten (vorderen, niederenergetischen) Peak ergab sich so eine FWHM von 5,3, beim zweiten eine von 6,6 Kanälen. Um den Kanälen die entsprechenden Energien zuzuordnen, setzten wir ein lineares Verhältnis zwischen Energie E und Kanalnummer K voraus, u.A., dass gilt: $E(K=0) = 0 \text{ keV}$. Die Kalibrierungsgerade ergab sich dann im folgenden Diagramm, die Gleichung lautet $E(K) = 3,05 \cdot K$.

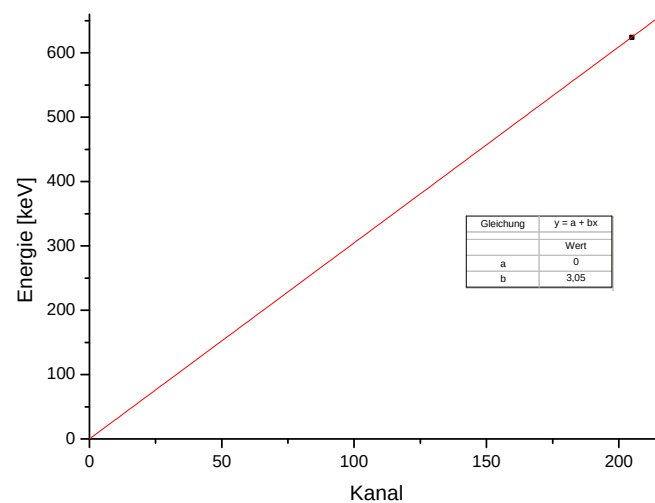


Abbildung 3: Kalibrierungsgerade, gefittet durch den Ursprung

Mit Hilfe dieser Kalibriergerade kann man nun zu entsprechenden Kanälen eine Energie aus-

rechnen. Die Kanalbreite ergibt sich zu 3,05 keV, das Auflösungsvermögen für Peak 1 liegt bei 16,2 keV, bei Peak 2 bei 20,1 keV.

Aus dem Spektrum kann man die Maximalenergie nur schwer ablesen, also bestimmt man diese über den sog. Fermi-Plot. Hierzu trugen wir $\sqrt{\frac{N(E)}{pWF(Z,E)}}$ über die Energie E auf; mit $p = \sqrt{E^2 + 2mE}$, $W = E + m$, $m = 511 \text{ keV}$ und $F = 6$. Es müsste sich theoretisch eine Gerade ergeben, denn dieser Term ist proportional zu $(E_0 - E)$, wobei E_0 die vorläufige Maximalenergie der Beta-Strahlung darstellt. Das erhaltene E_0 muss korrigiert werden, denn bei unseren Beta-Zerfällen handelt es sich um verbotenen Übergänge, da sich der Kernspin I um 2 ändert. Es muss folgender Faktor S_1 auf der linken Seite ergänzt werden: $S_1 = ((E + m)^2 - m^2 + (E_0 - E)^2)^{-1/2}$. Wir erhielten folgende Fermi-Plots:

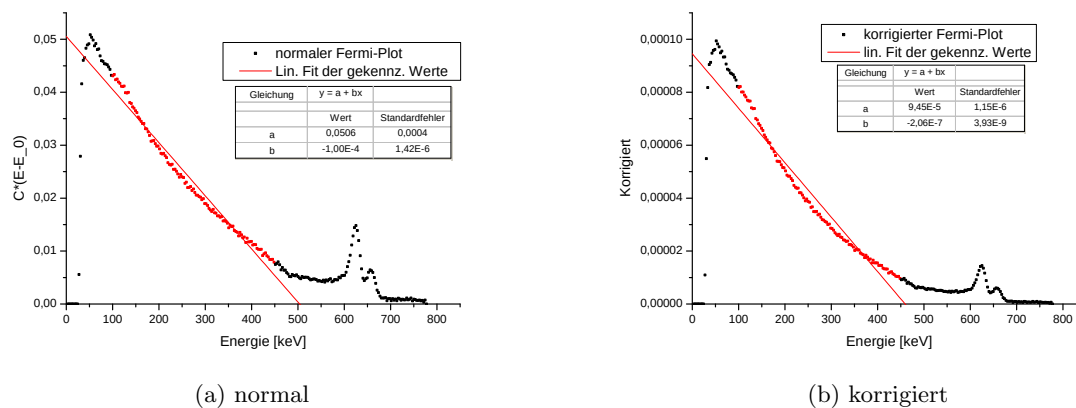


Abbildung 4: Fermiplots von Cäsium-137

Aus dem ersten Fermi-Plot ergibt sich das vorläufige E_0 zu $E_0 = -\frac{a}{b} = 506 \text{ keV}$. Aus dem korrigierten Plot erhält man die gesuchte Maximalenergie der Elektronen von $E_{0, \text{kor}} = 459 \text{ keV}$.

3.2 Krypton

Auch hier nahmen wir zuerst das Untergrundspektrum auf. Logarithmisch dargestellt ergab sich die auf der nächsten Seite befindliche Grafik. Hier erkennt man auch wieder deutlich das Compton-Kontinuum mit abschließender Compton-Kante. Die maximale Energie der Compton-Elektronen ergibt sich hier theoretisch zu $E_{\text{max}} = 343 \text{ keV}$. Im Diagramm befindet sich die Compton-Kante bei Kanal 117, was einer Energie von 357 keV entsprechen würde. Theorie und Praxis unterscheiden sich auch hier nur geringfügig: um ca. 4%. Diesen Fehler kann man natürlich durch eine besser auflösende Versuchsanordnung verringern, wir sind jedoch mit dem hier erhaltenen Ergebnis sehr zufrieden.

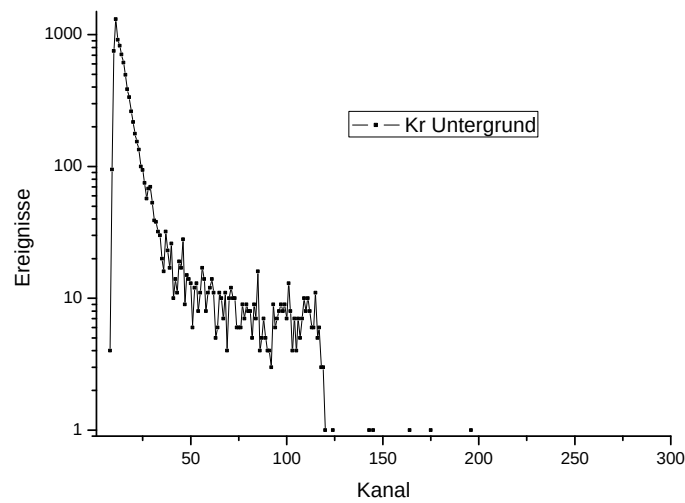


Abbildung 5: Gammauntergrund von Krypton

Für das Krypton-85-Isotop ergab sich nach Abzug des Gamma-Untergrundes folgendes Spektrum:

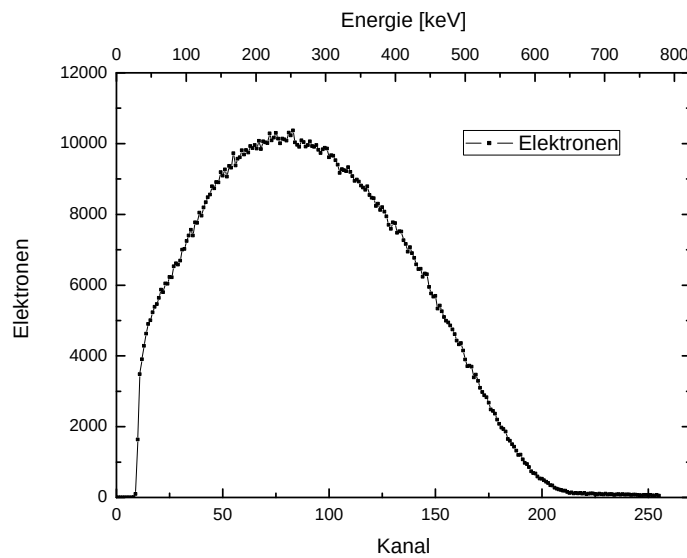


Abbildung 6: Spektrum der Beta-Elektronen von Krypton

Als deutlichen Unterschied zu Cäsium, erkennt man, wie in der Einleitung vorhergesagt, keinen Einfluss der Konversionselektronen. Grund: Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher ist relativ gering im Vergleich zu den direkt aus dem Kern kommenden Elektronen.

Die Anzahl der registrierten Elektronen ist hier weitaus höher, obwohl die Messdauer nur halb so lang war, was wir auf eine höhere Aktivität (Zerfälle pro Sekunde) zurückführen.

Um die Maximalenergie zu bestimmen, haben wir wieder den Fermiplot mit $F = 5$ berechnet und mit entsprechendem Faktor S_1 korrigiert:

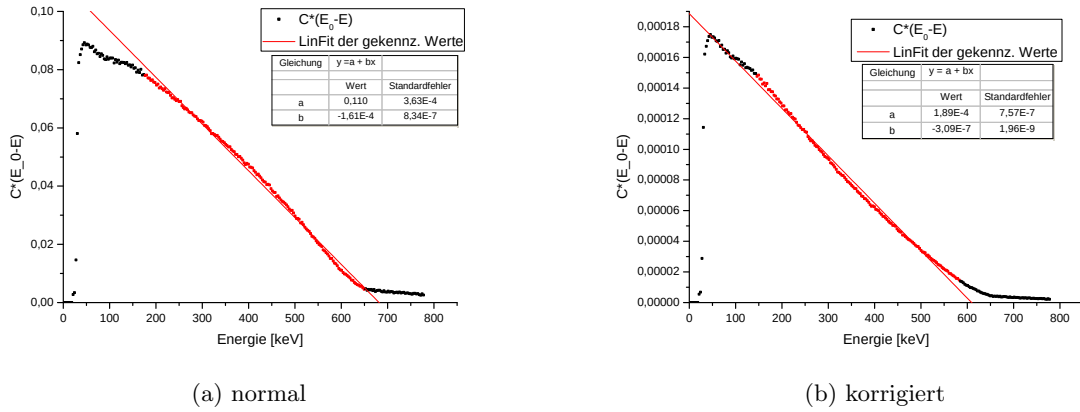


Abbildung 7: Fermiplots von Krypton-85

Aus dem ersten Fermiplot erhalten wir $E_0 = 683 \text{ keV}$ und können damit die korrigierte Maximalenergie bestimmen: $E_{0,korr} = 611 \text{ keV}$.

3.3 Absorption

Die K-Konversionselektronen (vorderer Peak im Cs-Spektrum) verlieren im Mittel Energie mit zunehmender Flächenmasse, denn die Streuwahrscheinlichkeit steigt mit der Flächenmasse. Der Energieverlust dieser Elektronen ist in folgender Grafik dargestellt:

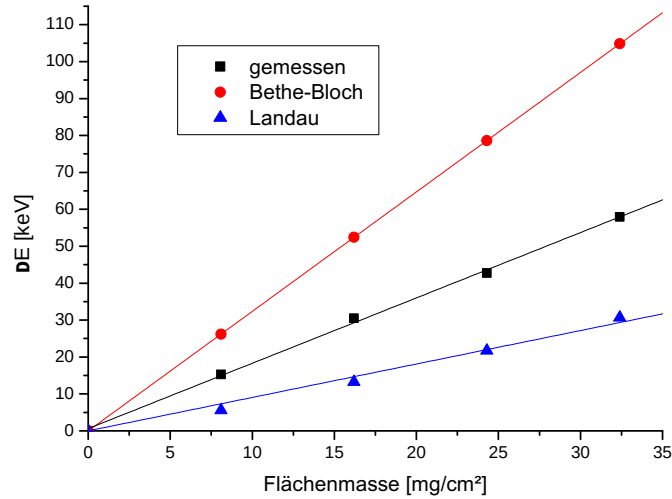
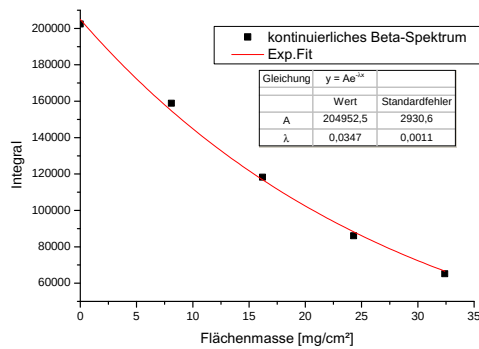


Abbildung 8: Energieverlust der K-Konversionselektronen

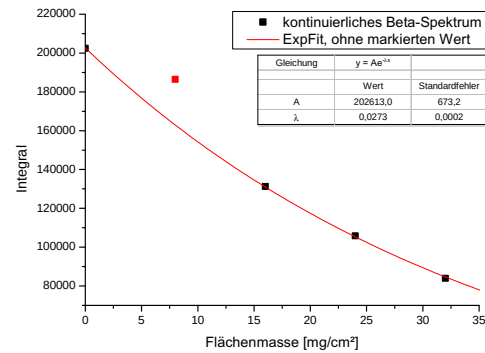
Schwarz eingezeichnet sind unsere gemessenen Werte, wobei wir jeweils die Position des Maximums des jeweiligen Konversionselektronen-Peak genommen haben; die roten Werte lieferte uns die Bethe-Bloch-Gleichung (s. Anleitung) mit der Flächenmasse ρx und der rel. Geschwindigkeit $\beta^2 = \left(\frac{p}{E}\right)^2 = \frac{E^2 - m^2}{E^2}$, wobei $E = E_{c,K} = 624,2 \text{ keV}$ (s. Seite 2); die blauen Werte ergeben sich nach Landau. Im Gegensatz zu den BeBl-Werten gilt bei Landau nicht $\Delta E \sim \rho x$, denn die

Flächenmasse steht hier im Argument des Logarithmus'. Trotzdem haben wir auch hier einen linearen Fit durchgeführt, um einen besseren Vergleich anstellen zu können. Die Anstiege der Geraden ergeben sich zu 0,91 (Landau), 1,77 (Exp.) und 3,24 (BeBl).

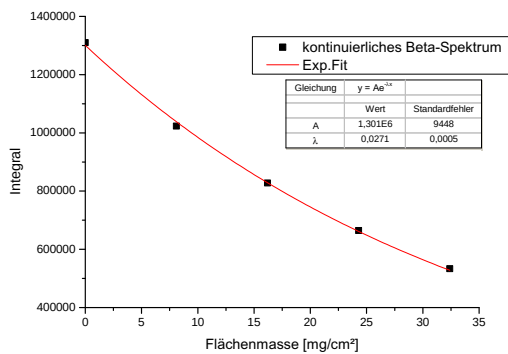
Summiert man über alle Beta-Elektronen im kontinuierlichen Beta-Spektrum, d.h. ohne die Konversionspeaks, so kann man die integrale Absorption in Abhängigkeit von der Flächenmasse darstellen. Hier dargestellt ist die integrale Transmission, jedoch kann man hier auch die Absorption rauslesen.



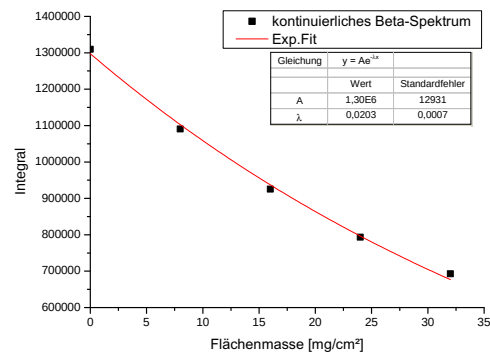
(a) Cäsiumquelle, mit Alu-Absorber



(b) Cäsiumquelle, mit Papier-Absorber



(c) Kryptonquelle, mit Alu-Absorber



(d) Kryptonquelle, mit Papier-Absorber

Abbildung 9: Integrale Transmission in Abhängigkeit von der Flächenmasse

Die Schwächungskoeffizienten λ , unter Annahme einer exponentiellen Absorption sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

	Aluminium	Papier
Cäsium	$0,0347 \pm 0,0011$	$0,0273 \pm 0,0002$
Krypton	$0,0271 \pm 0,0005$	$0,0203 \pm 0,0007$

Tabelle 1: Massenschwächungskoeffizienten in scm/mg

4 Ergebnis und abschließende Diskussion

Das Cäsium-137 zerfällt hauptsächlich über den metastabilen Barium-137m-Kern und ändert dabei den Kernspin um 2 und die Parität. Den Beta-Zerfall kann man also als verbotenen Gamow-Teller-Typ 1 einordnen, weshalb wir auch den erhaltenen Maximalwert der Energie aus dem Fermiplot korrigieren mussten. Das Krypton-85 zerfällt hauptsächlich direkt in Rubidium-37, ebenfalls unter Paritätswechsel und Kernspinänderung um 2. Demzufolge handelt es sich auch hier um den verbotenen Gamow-Teller-Typ 1.

Unser Spektrometer besaß ein Auflösungsvermögen von 16 bis 20 keV im Bereich um 650 keV.

In folgender Tabelle sind noch einmal die Grenzenergien der Betastrahler zusammengefasst:

Isotop	Fermi-Plot	Korr. Fermi-Plot	theoretischer Wert
^{137}Cs	506	459	514
^{85}Kr	683	611	687

Tabelle 2: Grenzenergien in keV

Auffallend ist, dass die aus den normalen Fermi-Plots gewonnenen Energien sehr gut mit den theoretischen Werten übereinstimmen, die Korrektur jedoch ein abweichendes Ergebnis liefert. Da wir aufgrund mehrmaligen Prüfens der Eingabe nicht davon ausgehen, dass wir die Formeln falsch benutzt haben, müssten wir den Fehler auf die Messungen zurückführen können. Die Kalibrierung hat wohl kaum Einfluss auf das Ergebnis, denn die E_0 lagen ja in der Nähe der festen Werte E_e , dürften also höchstens um eine Kanalbreite, d.h. ca. 5 keV vom wahren Wert abweichen.

Der Fermi-Plot war ja gedacht, als Linearisierung des Spektrums, jedoch ist uns das unserer Meinung nach beim Cäsium nicht sonderlich gut gelungen. Das Berechnen der Maximalenergie ist hier stark abhängig von der Wahl der zu fittenden Messpunkte.

Zwischen dem Energieverlust der Konversionselektronen und der Flächenmasse stellt sich ein nahezu konstantes Verhältnis ein, die Theorien von Landau und Bethe-Bloch begrenzen unser erhaltenes Ergebnis. Dabei ist der experimentelle Verlust größer als der von Landau berechnete, und kleiner als der nach der Bethe-Bloch-Gleichung berechnete.

Wir haben festgestellt, dass Aluminium bei beiden Strahlenquellen um ca. 30% besser absorbiert, als Papier. Demzufolge tritt bei Aluminium auch größere Bremsstrahlung auf, die man bei einem effektiven Strahlenschutz möglichst ableiten sollte (z.B. durch Verkippen des Absorbers um die Abstrahlrichtung zu beeinflussen) oder durch Einbringen eines zusätzlichen Gamma-Absorber mit hoher Dichte und Massezahl (wie zB Blei) abschirmen sollte.