

γ -SPEKTROSKOPIE

Simon C. Leemann, Abteilung für Physik

Januar 1999

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	2
2. Problemstellung.....	3
3. Messung der γ -Dosisleistung.....	4
4. γ -Spektroskopie mit dem NaI-Szintillator.....	7
5. γ -Spektroskopie mit dem Halbleiterdetektor.....	9
6. Literaturhinweise.....	13
7. Anhang: Messplots.....	A1-A15

1. Zusammenfassung

Mit Hilfe des Gammaskpektrometers kann man an beliebigen Proben sowohl qualitative wie quantitative γ -Strahlungsmessungen durchführen. Diese sind gerade wegen der möglichen gesundheitlichen Schädigung durch ionisierende Strahlung von grossem Interesse.

Dieser Bericht umfasst die Messresultate verschiedener Messungen radioaktiver Proben: Zuerst soll eine mögliche gesundheitliche Beeinträchtigung durch die darauf folgenden Messungen ausgeschlossen werden, anschliessend werden bekannte Proben qualitativ wie quantitativ gemessen, um anschliessend Rückschlüsse auf unbekannte Proben zu machen und zuletzt werden Messungen mit einem sehr präzisen Halbleiterdetektor durchgeführt.

Der Bericht soll vor allem Ergebnisse wiedergeben, dazu Berechnungen der Aktivität und Schlussfolgerungen. Es wird für die zugrundeliegende Theorie und die Funktionsweise der Messgeräte auf die Literaturhinweise verwiesen, insbesondere auf die Anleitung zum Versuch¹. Neben dem Vertiefen der Theorie waren einige „Messungen“ erforderlich um die Geräte kennenzulernen und sich mit der Software vertraut zu machen; diese werden im Bericht nicht ausgeführt, da sie als vorbereitend betrachtet werden. Es empfiehlt sich aber sehr, diese im Vorfeld einer Messreihe, wie im folgenden beschrieben, zu absolvieren, um sich der Problematik und Grenzen der Messapparatur bewusst zu werden.

Im Anhang am Schluss des Berichts sind die Originalplots mit den im Detektor gemessenen Aktivitäten der jeweiligen Proben und Gemische zu finden. Die Aktivitäten sind fehlerbehaftet und der entsprechende relative Fehler ist ebenfalls angegeben. Diese Daten wurden benutzt als Messgrundlage für die Auswertungen des Berichts.

¹ Gamma-Spektroskopie, Versuchsanleitung, Physikalisches Praktikum für Vorgerückte, ETHZ

2. Problemstellung

Man soll die Bedienung des Gammaskpektrometers kennenlernen und nach Abschluss des Versuchs in der Lage sein, selbständig quantitative γ -Strahlungsmessungen durchzuführen. Dazu misst man zuerst die γ -Dosisleistung der aktivsten Quelle und berechnet deren Aktivität. Anschliessend sollen die Spektren verschiedener Radionuklide und schliesslich unbekannte Gemische mit einem NaI-Szintillator gemessen und quantitativ ausgewertet werden. Zuletzt wird ein Halbleiterdetektor verwendet, um ein γ -Spektrum aufzunehmen und mit den Resultaten des Szintillators zu vergleichen.

3. Messung der γ -Dosisleistung

Mit einem γ -Dosisleistungsmessgerät habe ich die γ -Dosisleistung der aktivsten Probe, nämlich ^{137}Cs , ohne Abschirmung gemessen. Dazu wurde die Probe in verschiedenen Abständen vom Messgerät aufgestellt und der Ausschlag des Messgeräts notiert. Die Werte ergaben — wie erwartet — eine Verteilung von der Form r^{-2} .

r [m]	D(r) [mR/h]
0.045 ± 0.003	4.000 ± 0.100
0.050 ± 0.003	3.100 ± 0.300
0.060 ± 0.003	2.500 ± 0.200
0.075 ± 0.003	1.600 ± 0.300
0.090 ± 0.003	1.050 ± 0.150
0.100 ± 0.003	0.900 ± 0.100
0.110 ± 0.003	0.800 ± 0.100
0.120 ± 0.003	0.700 ± 0.100
0.150 ± 0.003	0.500 ± 0.100
0.200 ± 0.003	0.300 ± 0.110
0.250 ± 0.003	0.210 ± 0.050

Der zu berücksichtigende Umgebungsuntergrund lag bei (0.04 ± 0.02) mR/h und damit unterhalb der Messgenauigkeit meiner übrigen Werte. Er wird deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Da man einen Dosispol im Abstand null erwartet und sowohl das Messgerät wie die Probe einen „unzulänglichen Abstand“ aufweisen, kann man annehmen, dass die Dosisverteilung durch folgende Funktion gegeben ist:

$$D(r) = \frac{D_0}{(a + r)^2} \quad (3.1)$$

Hier bezeichnet $D(r)$ die gemessene Dosis im Abstand r zur Probe, D_0 die Referenzdosis in einem Meter Abstand und a die „unzulängliche Länge“. Ich habe einen Fit gemacht für die gemessenen Werte um die Unbekannten D_0 und a zu erhalten; dies ergab:

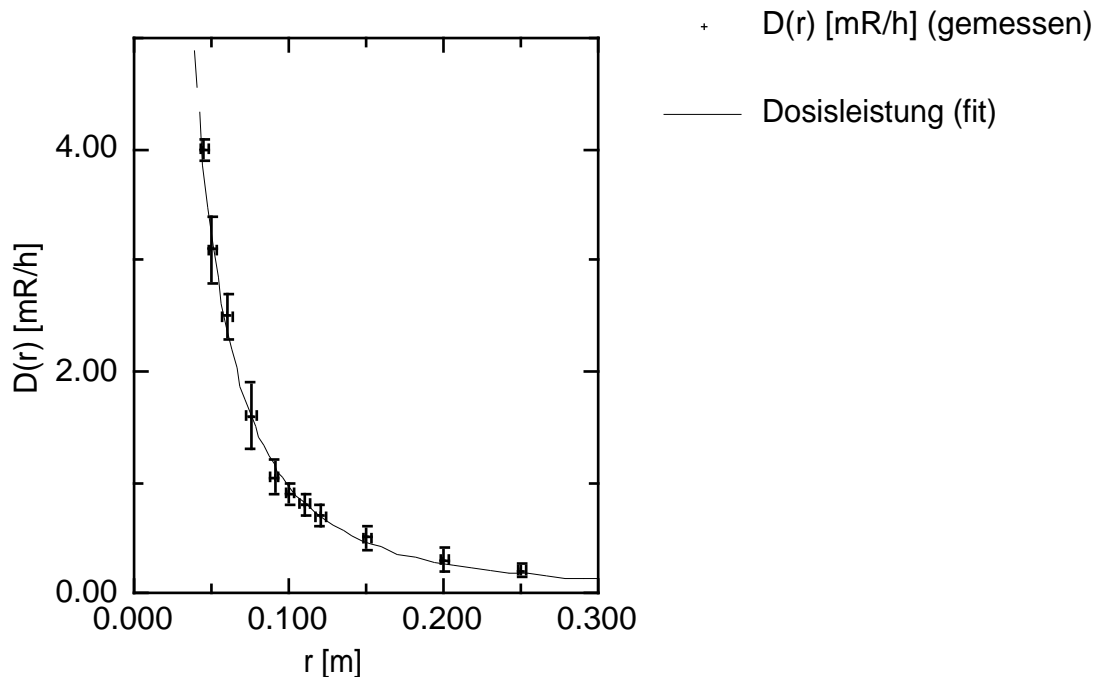


Abb. 3.1: Fit der Dosisleistung als Funktion von der Form (3.1).

$$D_0 = (1.1596 \pm 0.1554) \cdot 10^{-2} \text{ mR/h} = (2.9918 \pm 0.4009) \cdot 10^{-9} \text{ C/kg} \cdot \text{h}$$

$$a = (9.8145 \pm 5.2853) \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Eine Faustregel besagt, dass die Aktivität $1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ im Abstand von 1 m eine Dosisleistung von $1 \text{ R/h} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} \cdot \text{h}$ erzeugt. Mit Hilfe des Fits ergibt $D(r = 1 \text{ m}) = (2.9339 \pm 0.3982) \cdot 10^{-9} \text{ C/kg} \cdot \text{h}$ und damit hat die Probe eine Aktivität von $(4.2075 \pm 0.5711) \cdot 10^5 \text{ Bq}$. Es drängt sich jetzt die Frage auf, ob dieser Fehler sinnvoll ist, wenn der Berechnung nur eine Faustregel zugrunde liegt. Ich werde nach den quantitativen Messungen mit dem Halbleiterdetektor darauf zurück kommen.

Nun zur Strahlenbelastung: Um herauszufinden welcher Strahlungsdosis man ausgesetzt ist, wenn man die Probe bspw. in der Hand hält (wie dies sicherlich während der gesamten Versuchszeit ca. zehn Minuten der Fall ist), berechnet man die Dosisleistung im Abstand null, d.h. die Probe liegt direkt auf der Haut, sodass nur der „unzulängliche Abstand“ als Abschirmdistanz dient: $D(r = 0 \text{ m}) = (3.1059 \pm 3.3452) \cdot 10^{-5} \text{ C/kg} \cdot \text{h}$. Über die Ionisationsenergie der Luft gelangt man zur absorbierten Dosis in Gray² und diese ist gleich der Äquivalentdosis in Sievert, da der Wichtungsfaktor für Photonen aller Energien eins ist: $D_E = (1.0467 \pm 1.1273) \text{ mSv/h}$. Für die Zeit in der man die Probe wirklich in der Hand hält ergibt dies ca. 0.2 mSv.

Um die gesetzlich zugelassene Strahlenbelastung für beruflich nicht strahlenexponierte Personen von 1 mSv/a zu überschreiten, müsste man die Probe während ca. 1 h/a in den Händen halten! Dies erscheint auf den ersten Blick als erstaunlich grosse Belastung, doch man muss bedenken, dass der gesetzliche Grenzwert für die Exposition von Personen gegenüber einer bestimmten Quelle (bspw. Angestellte einer Fabrik zur Herstellung von Tracern für biochemische Laboratorien) deklariert — ein durchschnittlicher Einwohner der Schweiz hat

² The Physics of Radiology, Harold E. Johns, John R. Cunningham, Charles C. Thomas Publisher, 1983, Seiten 234, 235

4. γ -Spektroskopie mit dem NaI-Szintillator

Die Messapparatur (NaI-Szintillator, Photomultiplier, Software) erlaubt die Messung der Ereignisse (counts/sec) einer bestimmten Probe. Betrachtet man die Photopeaks⁴, so ist man in der Lage eine Menge an Ereignissen einer bestimmten Emissionsenergie zuzuschreiben. Dies wird gemacht indem die Anzahl der Ereignisse um einen Photopeak integriert werden. Diese Gebiete sind auf den Plots im Anhang zu sehen und unterhalb sind die berechneten Resultate aufgetragen — jeweils neben der zugehörigen Photopeakenergie. Daneben ist der relative Fehler angegeben. Um diese Daten in möglichst guter Genauigkeit zu erhalten ist eine sehr gute Eichung mit einer bekannten Probe unbedingt erforderlich. Kleine Schwankungen oder Pausen zwischen den Messreihen können bedeutende Abweichungen zur Folge haben.

A1 - A8 zeigen die Resultate der γ -Spektroskopie von verschiedenen Isotopen und Isotopengemischen. Die qualitative γ -Spektroskopie erlaubt anzugeben um welche Isotopen (-gemisch) es sich handeln kann, denn jedes Isotop zeigt ein charakteristisches Emissionsspektrum, indem die Photopeaks herausragen aus einem Untergrund. Bestens sichtbar ist dies beim ^{137}Cs (siehe A3), wo man bei 662keV einen ausgeprägten Photopeak und links davon dessen Compton-Verteilung erkennt. Dies ist allerdings ein etwas einfaches Beispiel, denn die Auflösung des Photopeaks vom Compton-Rücken ist abhängig von der Energie und der Probe; bei der 662keV-Linie von ^{137}Cs sind diese Unterschiede viel besser zu erkennen als bei anderen Proben und Energien.

Die quantitative γ -Spektroskopie erlaubt das Messen der Aktivität einer Probe anhand der Emissionsereignisse pro Zeiteinheit und Energie. Dazu benötigt man die Anzahl Ereignisse eines bestimmten Peaks, den man via Software definieren kann (ROI)⁵. Ist der Untergrund zu hoch oder der Peak schlecht aufgelöst, dann kann es vorkommen, dass die Ereignisse für bestimmte Peaks nicht errechnet werden können, obwohl eine grosse Messzeit gewählt wird; dies sieht man deutlich bei ^{22}Na (siehe A1). Hat man aber eine stark strahlende Probe mit deutlichen Photopeaks wie ^{137}Cs (siehe A3), dann kann man die Aktivität der Probe bestimmen. Sie ist gegeben durch⁶:

$$A = \frac{N_{\text{photo}}}{\frac{\Omega}{4\pi} \cdot \varepsilon(E_{\gamma}) \cdot \Gamma(E_{\gamma}) \cdot \omega(E_{\gamma})} \quad (4.1)$$

Der Zähler ist die gemessene Zählrate des gewählten Photopeaks, der erste Term im Nenner beschreibt den Raumwinkelanteil, der zweite die totale Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors bei der Energie E_{γ} , der dritte den Anteil der Photoemission an der gesamten Emission bei der Energie E_{γ} und der vierte die Emissionswahrscheinlichkeit der betrachteten Linie bei E_{γ} . N_{photo} wird von der Software zusammen mit dem relativen Fehler angegeben. Der Raumwinkelanteil hängt von den Detektordimensionen ab und kann aus der Tabelle abgelesen werden; für die verwendete Apparatur beträgt er 0.200 ± 0.100 . Die anderen Grössen hängen alle ab von der Energie der jeweiligen Linie und können in Tabellen nachgeschaut werden. Im folgenden sind die Messdaten und die berechneten Aktivitäten für ^{137}Cs und ^{207}Bi angegeben:

⁴ Gamma-Spektroskopie, Versuchsanleitung, Physikalisches Praktikum für Vorgerückte, ETHZ, Seite 13

⁵ User Manual for PCA Software, The Nucleus Inc.

⁶ Gamma-Spektroskopie, Versuchsanleitung, Physikalisches Praktikum für Vorgerückte, ETHZ, Seite 15

	Linie [keV]	N [Bq]	% ERR	ΔN [Bq]	$\Omega/4\pi$	Δ	ε	$\Delta\varepsilon$	Γ	$\Delta\Gamma$	ω [%]	A [Bq]	ΔA [Bq]
Cs-137	37.070	399.140	0.870	3.473	0.2	0.1	0.980	0.020	0.950	0.050	1.260	170127.700	85617.053
	660.960	5310.460	0.160	8.497	0.2	0.1	0.460	0.060	0.550	0.050	84.620	124024.820	65072.297
Bi-207	77.650	345.580	0.710	2.454	0.2	0.1	0.990	0.010	0.940	0.060	38.600	4810.257	2425.375
	568.950	337.900	0.720	2.433	0.2	0.1	0.480	0.060	0.570	0.050	98.000	6301.095	3294.524
	1060.850	131.180	1.050	1.377	0.2	0.1	0.390	0.060	0.320	0.040	77.000	6825.466	3671.846
	1782.110	7.640	4.840	0.370	0.2	0.1	0.310	0.040	0.190	0.030	7.000	9265.098	5023.039

Abb. 4.1: Messwerte und berechnete Aktivitäten für ^{137}Cs und ^{207}Bi .

Wenn man die erhaltenen Aktivitäten für die jeweiligen Isotope mit ihrem Fehler gewichtet, findet man eine mittlere Aktivität; sie beträgt $(1.43933 \pm 0.15997) \cdot 10^5$ Bq für ^{137}Cs und $(6.400657 \pm 0.738841) \cdot 10^4$ Bq für ^{207}Bi .

Misst man eine unbekannte Probe, so sieht man im Allgemeinen eine Überlagerung mehrerer Spektren. Diese kann nun anhand einer qualitativen γ -Spektroskopie auf eine Anzahl in der Probe enthaltener Isotope zurückgeführt werden. Als Beispiel dient das „Gemisch A“, das folgende Linien zeigt:

Gemisch A	Linie [keV]	N [Bq]	% ERR
Cs-137	35.050	264.529	1.070
Bi-207	78.080	226.612	1.990
Cs-137	658.200	3912.353	0.200
Co-60	1161.280	13.588	8.140
Co-60	1307.600	13.918	6.930

Abb. 4.2: Die Emissionslinien und Zählraten von „Gemisch A“.

Die Zuteilung der Linien zu einem bestimmten Isotop erfolgte anhand der Kenntnisse über die Spektren der bereits analysierten Isotope. Danach wird überprüft, dass allfällige weitere Linien eines bestimmten Isotops ebenfalls im Spektrum zu finden sind. Ein Beispiel für dieses Vorgehen ist die deutliche Linie bei 658.2 keV: Diese Linie ist aller Wahrscheinlichkeit nach von ^{137}Cs ; tatsächlich findet man eine weitere Linie von ^{137}Cs auch im Spektrum dieses Gemisches, nämlich diejenige bei 35.050 keV. Man kann daraus schliessen, dass sicher ^{137}Cs in dieser Probe enthalten ist. Wie oben beschrieben, könnte man hier ebenso die Aktivität der enthaltenen Isotopen berechnen; ich sehe aber davon ab wegen der schlechten Statistik, da ich nur eine oder zwei Linien jedes Isotops zur Verfügung habe.

5. γ -Spektroskopie mit dem Halbleiterdetektor

Möchte man genauere Analysen durchführen, so benutzt man einen Halbleiterdetektor. Dieser hat eine viel bessere Auflösung als der NaI-Szintillator und ermöglicht deshalb präzisere Aussagen. Die Resultate (siehe A9-A15) widerspiegeln dies deutlich. Das Vorgehen ist ähnlich wie beim Szintillator, nur dass hier die Daten über Raumwinkelanteil, Ansprechwahrscheinlichkeit und Photopeakanteil nicht tabelliert sind und zuerst mit einer Eichquelle bestimmt werden müssen. Man geht aus von der Formel (4.1) und definiert die Efficiency α :

$$\alpha(E_\gamma) = \frac{A}{N_{\text{photo}}} \cdot \omega(E_\gamma) = \left[\frac{\Omega}{4\pi} \cdot \varepsilon(E_\gamma) \cdot \Gamma(E_\gamma) \right]^{-1} \quad (5.1)$$

Damit hat man alle unbekanntes und energieabhängigen Grössen in die zu berechnende Funktion „verpackt“. Die Aktivität der Eichquelle lässt sich aus der Halbwertszeit und einer bestimmten Eichung (Zeitpunkt, Aktivität) errechnen. Als Eichquelle dient ^{152}Eu mit einer Halbwertszeit $\tau_{1/2} = 12.7$ a und einer Eichangabe von $40.6 \cdot 10^3$ Bq am 1. April 1996. Daraus erhält man die Aktivität am 14. Dezember 1998 (Messtag), also $(2.75 \pm 1/12)$ a später:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{\tau_{1/2}} \cdot t} \quad (5.2)$$

Am Messtag war die Aktivität der Probe also (34942 ± 159) Bq. Nimmt man jetzt das Spektrum von ^{152}Eu auf, so bekommt man die Linien mit der jeweiligen Zählrate. Jetzt kennt man die Efficiency für die betreffenden Linienenergien:

	Linie [keV]	N [Bq]	% ERR	ΔN [Bq]	ω [%]	α	$\Delta\alpha$	A [Bq]	ΔA [Bq]
Eichquelle	121.780	315.775	0.400	1.263	29.240	32.355	0.196	34941.567	158.922
Eu-152	244.700	58.631	1.100	0.645	7.616	45.388	0.540	34941.567	158.922
	344.280	153.161	0.550	0.842	27.000	61.597	0.440	34941.567	158.922
	444.000	14.052	2.490	0.350	2.839	70.594	1.787	34941.567	158.922
	688.700	2.313	10.070	0.233	0.846	127.832	12.886	34941.567	158.922
	778.860	34.261	1.280	0.439	12.990	132.480	1.800	34941.567	158.922
	867.490	9.394	3.290	0.309	4.176	155.329	5.159	34941.567	158.922
	964.060	31.052	1.280	0.397	14.580	164.063	2.229	34941.567	158.922
	1085.830	17.699	1.950	0.345	10.290	203.146	4.068	34941.567	158.922
	1112.070	27.024	1.370	0.370	13.580	175.587	2.535	34941.567	158.922
	1212.920	2.627	5.960	0.157	1.447	192.465	11.504	34941.567	158.922
	1299.160	2.703	4.900	0.132	1.706	220.534	10.853	34941.567	158.922
	1408.080	33.394	1.120	0.374	21.210	221.929	2.683	34941.567	158.922

Abb. 5.1: Emissionsspektrum der Eichquelle mit berechneter Efficiency.

Da die Efficiency abhängt von energieabhängigen Grössen muss eine Funktion gefunden werden, die von der Form $\alpha(E_\gamma)$ ist. Dies habe ich mit einem Fit gemacht, bei dem ich (wegen der Lage der Messpunkte) von einem Polynom ersten Grades ausgegangen bin:

$$\alpha(E_\gamma) = a \cdot E_\gamma + c \quad (5.3)$$

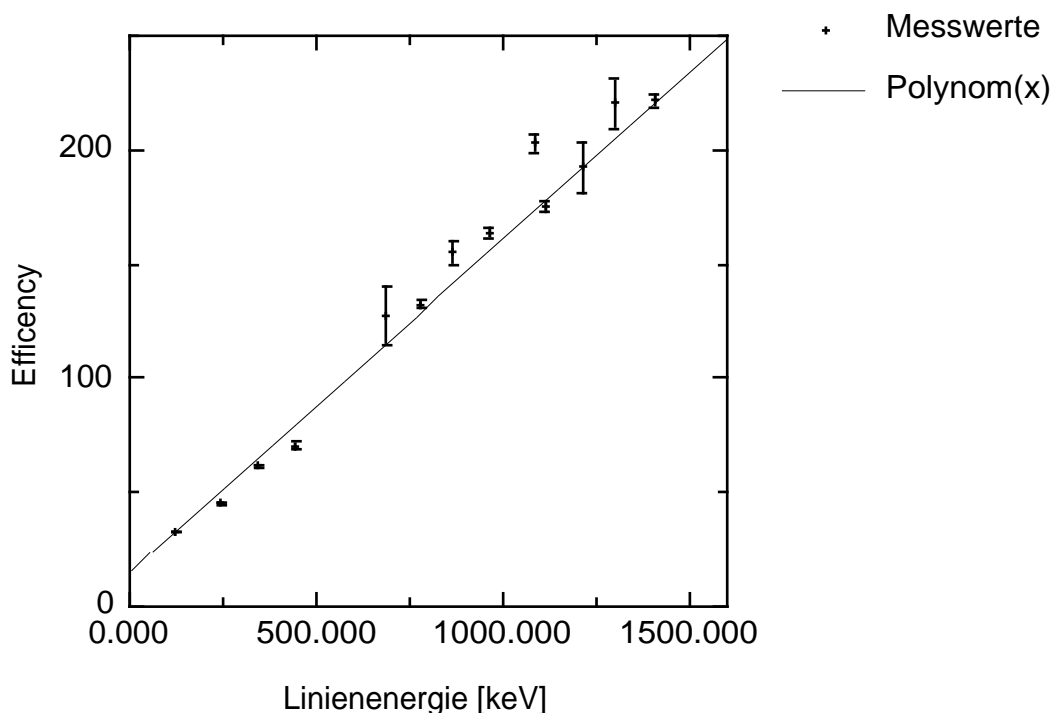


Abb. 5.2: Der Fit für die Efficiency α in Abhängigkeit der Energie E_γ .

Die errechneten Parameterwerte sind: $c = 13.7 \pm 0.3$ und $a = 0.146 \pm 0.001$. Da die Efficiency jetzt bekannt ist, kann man beliebige Proben mit dem Halbleiterdetektor messen und die Aktivität gemäss (5.1) berechnen. Dies habe ich für einige Isotopen gemacht:

	Linie [keV]	N [Bq]	% ERR	ΔN [Bq]	ω [%]	α	$\Delta\alpha$	A [Bq]	ΔA [Bq]
Bi-207	569.750	398.087	1.080	4.299	98.000	97.000	0.646	39402.440	0.050
	1063.730	174.565	1.590	2.776	77.000	169.248	1.135	38369.843	0.066
	1770.570	10.783	6.450	0.696	7.000	272.628	1.858	41996.465	0.272
Co-60	1174.080	11.940	1.320	0.158	99.860	185.387	1.247	2216.630	0.003
	1333.490	10.873	1.350	0.147	99.980	208.702	1.410	2269.675	0.003
Cs-137	662.020	815.541	0.280	2.284	84.620	110.495	0.735	106491.642	0.077
Na-22	511.170	1.137	5.790	0.066	179.800	88.432	0.591	55.922	0.000
	1274.730	0.305	10.400	0.032	99.940	200.108	1.350	61.070	0.001

Abb. 5.3: Emissionsspektrum verschiedener Proben mit berechneter Aktivität.

Die erhaltenen Aktivitäten können mit den entsprechenden Fehlern gewichtet werden um eine mittlere Aktivität zu erhalten; diese beträgt für ^{207}Bi : (39246 ± 437) Bq, für ^{60}Co : (2243 ± 19) Bq und für ^{22}Na : (57.665 ± 1.631) Bq. Da bei ^{137}Cs nur eine Linie gut aufgelöst werden konnte, ist die Statistik schlecht; die Aktivität (106491.642 ± 0.077) Bq ist deshalb mit Vorsicht zu verwenden.

Frappant erscheint der Unterschied (Faktor 4!) zwischen der errechneten Aktivität von ^{137}Cs mit dem Dosisleistungsmessgerät und dem Halbleiterdetektor (man erinnere sich an die Bemerkung bzgl. des Fehlers beim berechnen der Aktivität von ^{137}Cs anhand der Dosisleistung); berücksichtigt man aber, dass die Ablesegenauigkeit des Dosismessgeräts als sehr ungenau betrachtet werden muss und dass die Statistik von ^{137}Cs beim Halbleiterdetektor sehr schwach ist, dann erscheint die Diskrepanz plausibler. Die eigentlichen Ursachen für die grosse Abweichung liegen aber in der Faustregel und dem Dosisleistungsmessgerät selbst! Gemäss Strahlenschutzverordnung⁷ liegt der Γ_δ -Faktor für ^{137}Cs bei 0.32. Der Γ_δ -Faktor, der den Zusammenhang zwischen einer Aktivität und einer Dosisleistung für ein bestimmtes Isotop angibt, ist wie folgt definiert:

$$D(r) \left[\frac{\text{R}}{\text{h}} \right] = \Gamma_\delta \cdot \frac{\text{A}}{r^2} \left[\frac{\text{Ci}}{\text{m}^2} \right] \quad (5.4)$$

In der Faustregel wurde hingegen gerechnet, wie wenn der Γ_δ -Faktor eins betragen würde. Nun aber zum Messgerät: Mir ist aufgefallen, dass das Dosisleistungsgerät auch beim β -Zerfall einen Ausschlag zeigt! Berücksichtigt man die Entstehung der γ -Strahlung von ^{137}Cs , dann fällt auf, dass man neben der gemessenen γ -Strahlung der 662keV-Linie auch β -Strahlung misst und die Angaben des Dosisleistungsmessgerät zu einer zu hohen Aktivität führen: In 95% der Fälle zerfällt ^{137}Cs in einen angeregten Zustand von ^{137}Ba unter Emission von β -Strahlung (siehe Abb. 5.4). Anschliessend fällt ^{137}Ba in den Grundzustand unter Emission von γ -Strahlung. Diese γ -Strahlung führt zu der 662keV-Linie von ^{137}Cs und ist damit verantwortlich für die Resultate der Aktivitätsberechnungen sowohl beim NaI-Szintillator wie beim Halbleiterdetektor. Das Dosisleistungsmessgerät hingegen, misst den Einfall von β -Strahlung UND γ -Quanten! Wenn man damit die Aktivität der Probe berechnet, wird ein Ereignis sozusagen doppelt gezählt, da sowohl der β -Zerfall in den angeregten Zustand von ^{137}Ba , wie dessen γ -Zerfall in den Grundzustand zur Dosisleistung beigetragen haben.

⁷ Schweizerische Strahlenschutzverordnung, 1978, Anhang

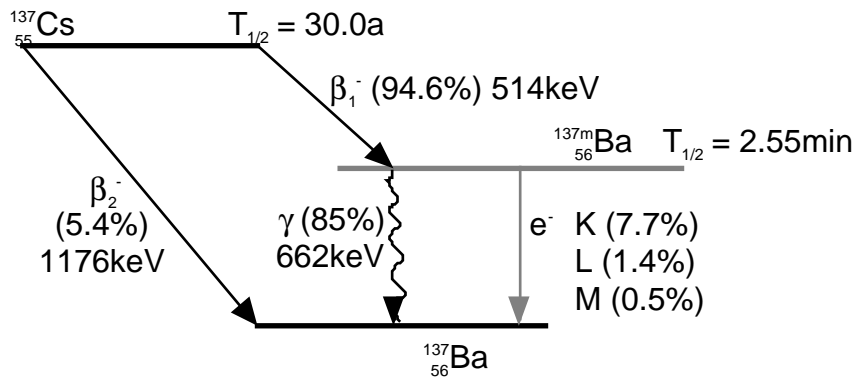


Abb. 5.4: Zerfallsschema von ^{137}Cs .⁸

Nach diesen Einwänden wird die Abweichung der aus der Dosisleistung berechneten Aktivität von der aus den Detektormessungen berechneten Aktivität verständlicher. Viel kleiner ist hingegen der Unterschied zwischen den Ergebnissen des NaI-Szintillators und des Halbleiterdetektors, v.a. beim ^{137}Cs , wo man beinahe von Übereinstimmung sprechen kann.

Zuletzt bleibt mir noch zu erwähnen, dass sicher einige Fehlerschranken zu gering bemessen sind: Während der Messreihe bemerkten wir, dass ein Wackelkontakt beim Eingang des Amplifiers für falsche Werte v.a. am unteren Rand des Energiespektrums verantwortlich ist. Da dieser Defekt nur provisorisch behoben wurde, kann man davon ausgehen, dass die Zählraten bei niederen Energien stark fehlerbehaftet sind. Bei höheren Energien hat sich dieses Problem geringfügiger bemerkbar gemacht. Abgesehen davon, ist wie bereits angetönt, die Eichung ein sehr grosses Problem. Selbst bei unmittelbar aufeinander folgenden Messungen derselben Probe bei denselben Bedingungen konnten Verschiebungen gegenüber der Eichung festgestellt werden! Dies erschwert eine tiefere Analyse der erhaltenen Messwerte zusätzlich und stellt die Verwendbarkeit der Daten eklatant in Frage.

⁸ The Physics of Radiology, Harold E. Johns, John R. Cunningham, Charles C. Thomas Publisher, 1983, Seite 83

6. Literaturhinweise

- Gamma-Spektroskopie, Versuchsanleitung, Physikalisches Praktikum für Vorgerückte, ETHZ
 - User Manual for PCA Software, The Nucleus Inc.
 - The Physics of Radiology, Harold E. Johns, John R. Cunningham, Charles C. Thomas Publisher, 1983
 - The Atomic Nucleus, Robley D. Evans, McGraw-Hill, 1955
 - Manual zu Strahlenschutzkurs K420, PSI Villigen
 - Schweizerische Strahlenschutzverordnung, 1978
-