

Lebensdauerermessung eines angeregten Kernzustandes mit LYSO-Szintillationsdetektoren

Bachelorarbeit in Physik

von

Thorsten Adolphs

angefertigt im

Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

August 2012

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Zitate wurden kenntlich gemacht.

Bonn, 31.08.2012

- 1. Gutachter:** PD Dr. Reiner Vianden
- 2. Gutachter:** Prof. Dr. Karl Maier

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Szintillationsdetektoren	3
2.1	Szintillatoren	3
2.1.1	Verwendete Szintillationskristalle	4
2.2	Sekundärelektronenvervielfacher	8
3	Detektoraufbau	11
4	Aufnahme von Energiespektren und Bestimmung der Energieauflösung	13
4.1	Versuchsaufbau	13
4.2	Auswertung der Spektren	13
4.2.1	Lutetiumyttriumsilikatoxid	14
4.2.2	Caesiumfluorid	16
4.2.3	Natriumiodid	16
4.3	Relative Nachweiswahrscheinlichkeit von Natriumiodid und Lutetiumyttriumsilikatoxid	26
4.4	Vergleich der drei Szintillationsmaterialien	26
5	Zeitauflösung und Lebensdauerermessung	29
5.1	Versuchsaufbau	29
5.2	Durchführung	30
5.3	Auswertung	31
5.3.1	Natriumiodid	32
5.3.2	Lutetiumyttriumsilikatoxid	33
5.4	Vergleich von Lutetiumyttriumsilikatoxid und Natriumiodid	36
6	Zusammenfassung	37
7	Anhang	39

1 Einleitung

Im Versuch "Nukleare Elektronik" wird eine Apparatur verwendet, mit der die Lebensdauern von angeregten Kernzuständen gemessen werden können. Die vorhandenen Natriumiodidszintillationsdetektoren sollen im Rahmen dieser Bachelorarbeit durch Detektoren ersetzt werden, die eine bessere Zeitauflösung als die verwendeten Natriumiodidkristalle (NaI(Tl)) und eine hohe Nachweiswahrscheinlichkeit von γ -Quanten haben. Szintillationsdetektoren mit Lutetiumyttriumsilikatoxid (LYSO) erfüllen diese Anforderungen. Das spektrale Maximum des emittierten Szintillationslichtes von LYSO liegt im sichtbaren Spektralbereich, sodass die Sekundärelektronenvervielfacher, welche mit ihnen verwendet werden, keine Fenster benötigen, die für Licht im UV-Bereich transparent sind. In dieser Bachelorarbeit werden zwei mit LYSO ausgestattete Szintillationsdetektoren montiert und getestet. Für Vergleichsmessungen werden auch noch Caesiumfluorid- und Natriumiodidszintillationsdetektoren verwendet. Hierzu werden erst Energiespektren von verschiedenen Isotopen aufgenommen und anschließend mit einem fast-slow-Koinzidenzkreis die Lebensdauer eines angeregten Kernzustandes gemessen.

2 Szintillationsdetektoren

Szintillationsdetektoren gehören zu den am meisten genutzten Gammadetektoren. Im wesentlichen bestehen sie aus zwei Teilen. Einem Szintillator, der bei Einfall eines γ -Quants Licht emittiert. Die Gesamtenergie des so emittierten Lichtes ist proportional zur Energie des einfallenden γ -Quants und einem Sekundärelektronenvervielfacher, der das Licht in ein auswertbares elektrisches Signal umwandelt.

Die Eigenschaften von Szintillationsdetektoren sind größtenteils aus [Leo94] und [Gru93] entnommen.

2.1 Szintillatoren

Zu den wichtigsten Szintillatoren gehören organische Szintillatoren, anorganische Szintillationskristalle und Gase. Je nach Anwendungsbereich werden verschiedene Szintillatoren verwendet.

Anorganische Szintillatoren, zu denen auch LYSO gehört, eignen sich aufgrund ihrer hohen Dichte und Kernladungszahlen (Abb. 2.1) gut zum Detektieren von γ -Quanten. Beide Eigenschaften erhöhen die Effizienz γ -Quanten zu absorbieren. Die Lichtausbeute von anorganischen Szintillationskristallen, also wie effizient sie die Energie des einfallenden γ -Quants in Szintillationslicht umwandeln können, ist unter allen Szintillatoren am größten. Dies verbessert die Energieauflösung, da durch mehr Szintillationslicht mehr Elektronen im Sekundärelektronenvervielfacher ausgelöst werden und statistische Schwankungen eine geringere Rolle spielen. Den Abfall der Intensität des Szintillationslichtes kann man durch einen exponentiellen Zerfall beschreiben. Die Zeitspanne, in der das Intensitätsmaximum des emittierten Szintillationslichtes auf $1/e$ gefallen ist, ist die Abklingzeit. Ein Nachteil von anorganischen Szintillatoren ist ihre im Vergleich zu organischen Szintillatoren große Abklingzeit. Des Weiteren sind viele anorganische Szintillationskristalle hygroskopisch und müssen in einer wasserdichten Hülle mit Durchlassfenster eingekapselt werden.

Der Szintillationsmechanismus von anorganischen Szintillationskristallen lässt sich in dem Bändermodell erklären.

Einfallende γ -Quanten lösen Elektronen aus dem Valenzband und regen sie ins Leitungsband an. Dies geschieht jedoch nur, wenn die Energie des einfallenden γ -Quants ausreichend groß ist, um die Bandlücke zu überwinden. Das zurückgelassene Loch und das losgelöste Elektron können sich nun frei durch den Kristall bewegen. Wenn die Energie nicht ausreichend groß ist, ist es auch möglich, dass das Elektron nicht in das Leitungsband, sondern in das darunter liegende Exzitonband angeregt wird (Abb. 2.2).

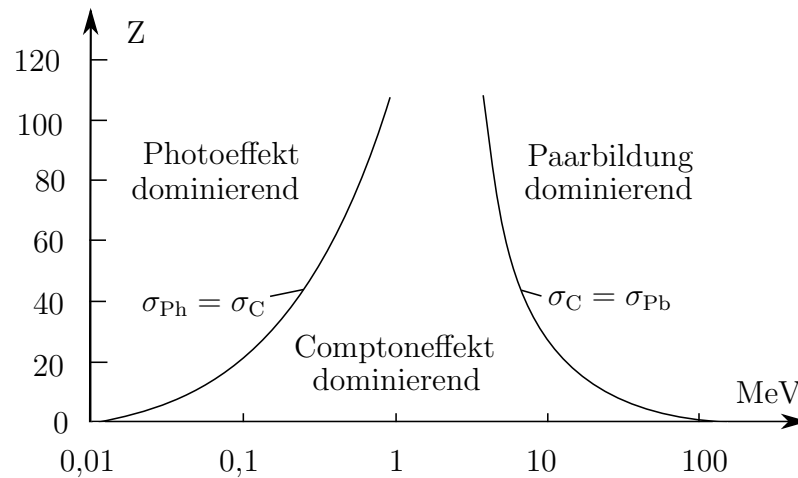


Abbildung 2.1: Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes des Photoeffekts, der Compton-Streuung und der Paarbildung von der Kernladungszahl Z , nach [Dem05]

Hierbei sind Loch und Elektron noch aneinander gebunden. Dieses Quasiteilchen wird Exziton genannt. Seine Zustände liegen direkt unter dem Leitungsband. Der Kristall ist für das von ihm emittierte Licht nicht transparent, er muss Licht emittieren, dessen Energie kleiner als die Bandlücke zwischen Valenz- und Exzitonband ist. Defekte im Kristall erzeugen lokal zusätzliche Energieniveaus. Rekombinieren die Elektronen von einem dieser Energieniveaus ins Valenzband, ist die Wellenlänge größer. Der Kristall kann zusätzlich mit Fremdatomen dotiert werden, die lokal zusätzliche Energieniveaus erzeugen. Diese Niveaus werden Aktivatorzentren genannt.

2.1.1 Verwendete Szintillationskristalle

Auch anorganische Szintillationskristalle unterscheiden sich in ihren Eigenschaften. Die drei verwendeten Szintillationskristalle werden hier kurz eingeführt und ihre wichtigsten Eigenschaften genannt. Eine Zusammenfassung dieser befindet sich in Tabelle 2.1 am Ende des Abschnitts.

Natriumiodid (NaI) ist der am meisten genutzte anorganische Szintillationskristall. Durch die hohe Lichtausbeute von $41 \frac{\text{Photonen}}{\text{keV}}$ [L'A98] hat NaI eine gute Energieauflösung. Nachteile sind seine Hygroskopie und die lange Abklingzeit von 230 ns [Leo94], die NaI

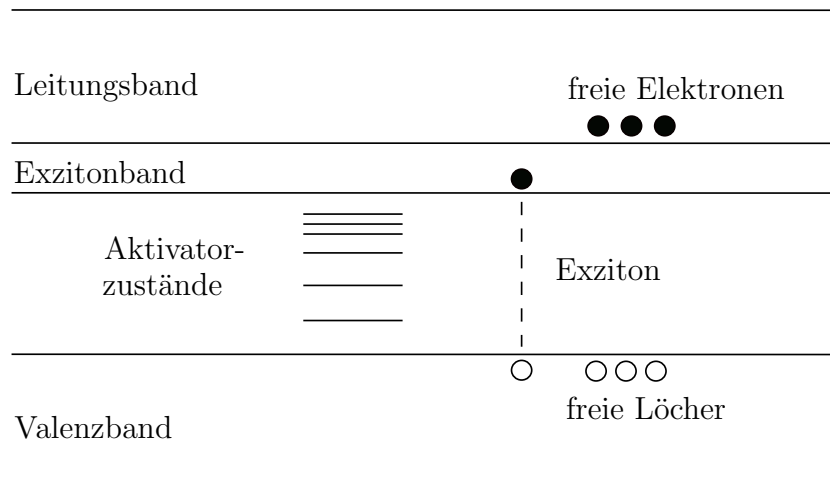


Abbildung 2.2: Bändermodell eines Festkörpers mit Fremdatomen dotiert, nach [Gru93]

eher ungeeignet für Zeitmessungen macht. NaI ist in geringen Mengen mit Thallium dotiert, welche als Aktivatorzentren dienen. Um die Dotierung erkenntlich zu machen, wird das Element, mit dem dotiert wird, in Klammern dazugeschrieben. In diesem Fall also NaI(Tl).

Caesiumfluorid (CsF) ist einer der wenigen anorganischen Szintillationskristalle, welche eine sehr kurze Abklingzeit besitzen. Sie beträgt nur ungefähr 5 ns [Leo94], ist also erheblich kürzer als die von NaI. Jedoch ist seine Lichtausbeute mit $2 \frac{\text{Photonen}}{\text{keV}}$ [L'A98] gering und eignet sich deswegen weniger für die Aufnahme von Energiespektren. Im Gegensatz zu NaI ist CsF nicht mit Fremdatomen dotiert. Hier entstehen die Aktivatorzentren durch Gitterdefekte. Wie NaI ist CsF hygroskopisch.

Lutetiumyttriumsilikatoxid (LYSO) ist ein relativ neues Szintillationsmaterial, was sich dadurch auszeichnet, dass es eine hohe Lichtausbeute von $32 \frac{\text{Photonen}}{\text{keV}}$ [Cry08] und gleichzeitig eine kurze Abklingzeit von 41 ns [Cry08] besitzt. Es hat eine gute Energie- und Zeitauflösung, aber nicht so gut wie die Energieauflösung von NaI und die Zeitauflösung von CsF. Das von *Saint Gobain*¹ gelieferte LYSO, PreLude420[®] genannt, besteht zu 81 % aus Lutetiumoxid, 14 % Silikatoxid und zu 5 % aus Yttriumoxid. Die Zusammensetzung kann auch variiert werden, indem Lutetium gegen Yttrium oder umgekehrt ausgetauscht wird. Lutetium enthält zu 2% das Isotop ^{176}Lu , welches radioaktiv ist. Dies kann, besonders bei Messungen mit Proben deren Aktivität in der Größenordnung des verursachten Untergrundes von ^{176}Lu liegt, störend sein. Jedoch ist LYSO im Gegensatz zu Natriumiodid und Caesiumfluorid nicht hygroskopisch und kann deswegen viel leichter gehandhabt werden. Ein weiterer Vorteil sind seine hohe Dichte von $\rho = 7,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

¹Saint-Gobain Crystals, 104 Route de Larchant, BP 551, 77794 Nemours Cedex, France

[Leo94] und hohe effektive Kernladungszahl $Z_{eff} = 60$ [Du09], wodurch mehr Strahlung im Kristall absorbiert werden kann. LYSO ist mit Cer dotiert, wird also LYSO(Cer) geschrieben.

^{176}Lu zerfällt über β^- -Zerfall zu 99,66% in den 596,82 keV-Zustand von ^{176}Hf (Abb. 4.4). Dieser zerfällt mit einer Kaskade von γ -Quanten der Energie 306,78 keV, 201,83 keV und 88,34 keV in den Grundzustand des ^{176}Hf . Diese γ -Quanten werden koinzident vom Detektor gemessen und erzeugen somit eine 596,82 keV-Photolinie. Es kann vorkommen, dass ein oder zwei γ -Quanten der Kaskade nicht detektiert werden, da sie den Kristall verlassen. Dadurch entstehen, wie in Abbildung 4.4 ersichtlich, vier verschiedene Linien im Spektrum. Die durch den β^- -Zerfall emittierten Elektronen werden vollständig vom Kristall absorbiert, wodurch zusätzlich ein β -Kontinuum im Spektrum entsteht.

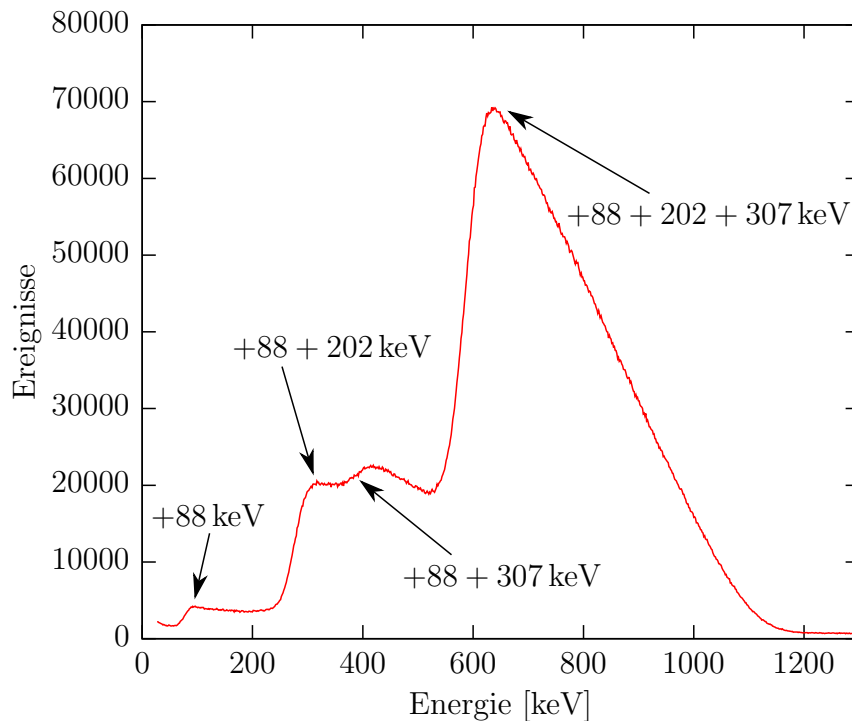


Abbildung 2.3: Untergrund von LYSO. .

Die gelieferten LYSO-Kristalle haben eine Zylinderform mit einer Höhe von 2,5 cm und einem Durchmesser von 4,5 cm. Eine Grundfläche des Zylinders ist glatt poliert. Die restlichen Oberflächen sind angeraut.

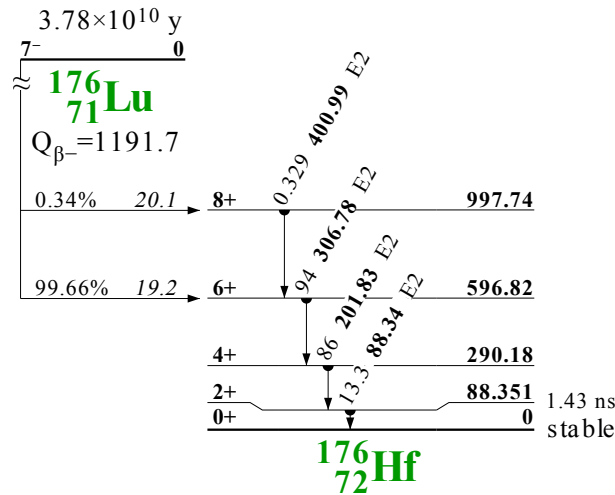


Abbildung 2.4: Das Zerfallsschema von ^{176}Lu [Fir96]. Der Q-Wert gibt die komplette Energie an, die vom Grundzustand des ^{176}Lu zum Grundzustand des ^{176}Hf abgegeben wird. Die Prozentzahlen am linken Rand geben an, wie stark der jeweilige Zustand bevölkert wird. Jeder Pfeil symbolisiert einen Übergang zwischen zwei Energieniveaus. Die erste Zahl an einem Pfeil gibt die Wahrscheinlichkeit für diesen Übergang an, die zweite die Energie des emittierten γ -Quant. Als drittes wird die Art des Übergangs angegeben.

	NaI [L'A98]	LYSO [Cry08]	CsF [L'A98]
Lichtausbeute [$\frac{\text{Photonen}}{\text{keV}}$]	41	32	2
Dichte [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$]	3,67	7,1	4,11
Zeitkonstante [ns]	230	41	2,9
Hygroskopisch	ja	nein	sehr
Emissionsmaximum [nm]	410	430	390
Brechungsindex	1,85	1,81	1,48

Tabelle 2.1: Eigenschaften der verwendeten Kristalle

2.2 Sekundärelektronenvervielfacher

Um die emittierten Photonen der Szintillationskristalle zu detektieren, wird ein Sekundärelektronenvervielfacher benutzt. Dieser besteht aus einer Photokathode, einer Dynodenkaskade und einem Spannungsteiler. Die Photonen gelangen durch ein Fenster auf eine Photokathode. Hier werden durch den Photoeffekt Elektronen ausgelöst. Auf die Photokathode folgen Fokussierungselektroden, die die auf der gesamten Fläche der Photokathode ausgelösten Elektronen auf die erste Dynode fokussieren. Diese ist Teil einer Dynodenkaskade. Die Dynoden liegen auf steigend positiverem Potential als die Photokathode bzw. die vorherige Dynode. Die Elektronen werden von einer Dynode zur nächsten beschleunigt und lösen beim Auftreffen auf die nächste zusätzliche Sekundärelektronen aus. Am Ende der Dynodenkaskade ist eine Anode, an der ein messbares elektrisches Signal abgegriffen werden kann (Abb. 2.5). Die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode kann entweder erreicht werden, indem man auf die Kathode ein negatives Potential oder auf die Anode ein positives Potential legt. Ein Spannungsteilersystem sorgt für die verschiedenen Potentiale der Dynoden.

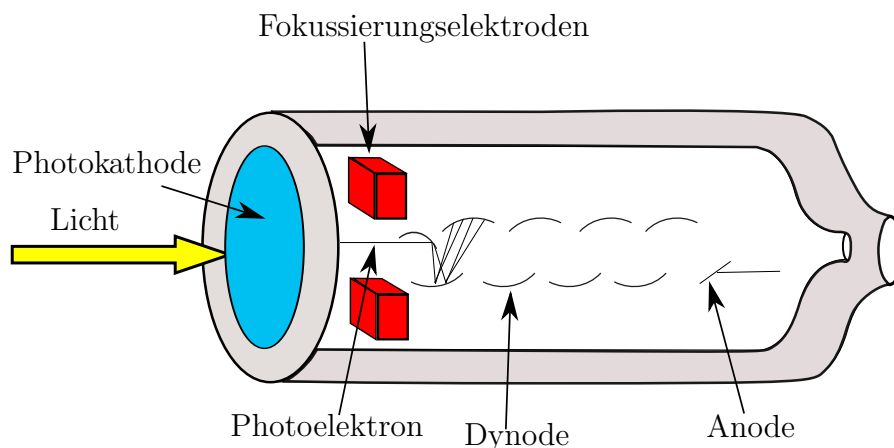


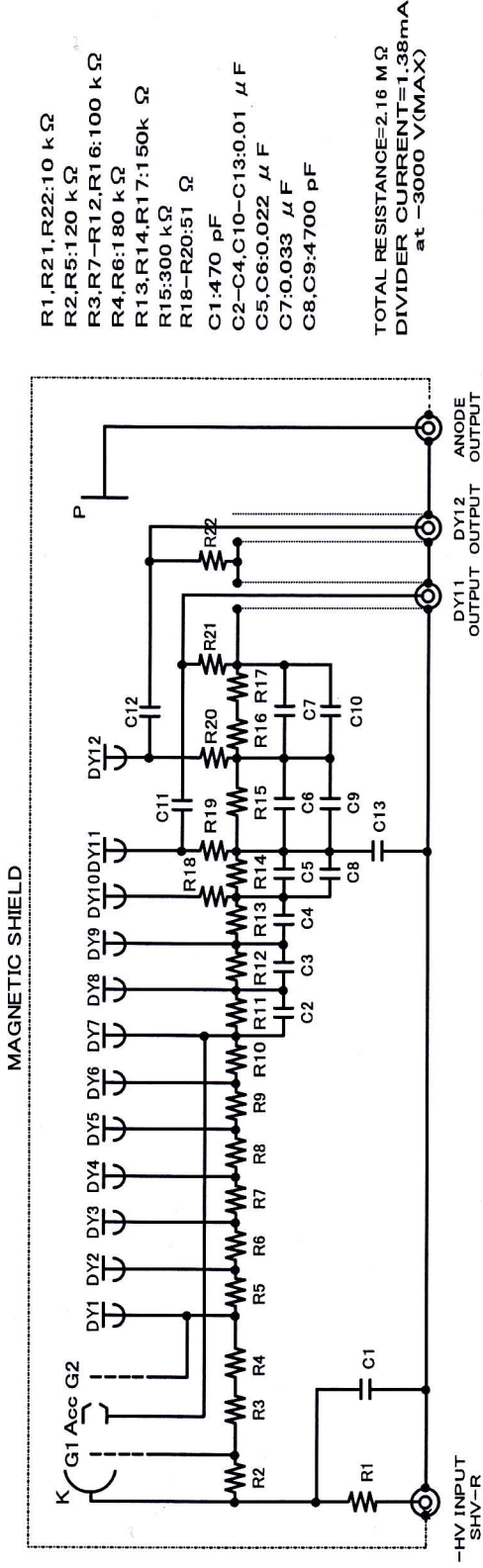
Abbildung 2.5: Aufbau eines Sekundärelektronenvervielfachers nach [Ham09]

In dieser Bachelorarbeit wird für alle Szintillationskristalle der H1949-50 Sekundärelektronenvervielfacher des Herstellers *Hamamatsu*² verwendet. Dieser verfügt über zwölf Dynoden und wird mit der Kathode auf negativem Potential von bis zu 3,5 kV betrieben. Der Spannungsteiler befindet sich an der Rückseite des Sekundärelektronenvervielfachers. Um den Sekundärelektronenvervielfacher befindet sich eine Schutzhülle. An der Seite des Durchlassfensters ist eine Schutzkappe angebracht. An der Rückseite sind drei Ausgänge. Einer greift das Signal an der Anode ab und die beiden anderen an der elften bzw. zwölften Dynode. Hierbei ist der Abgriff an einer Dynode der sogenannte

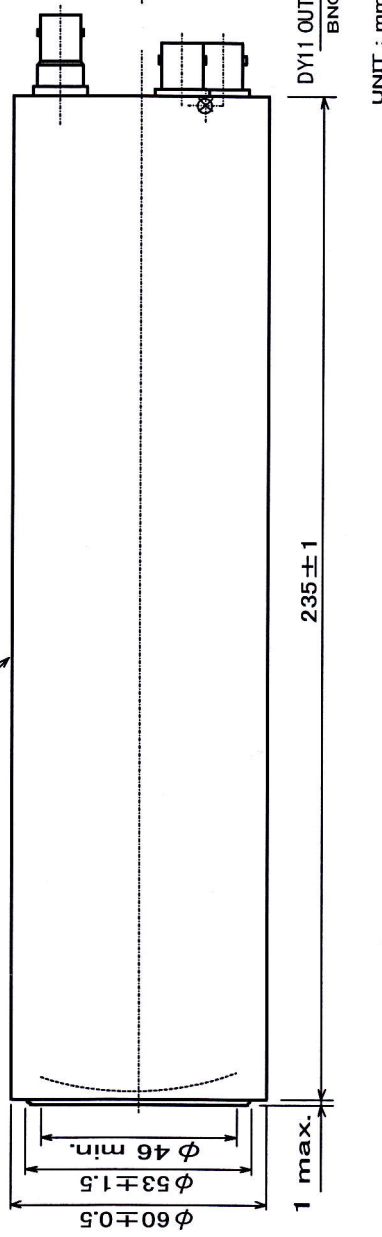
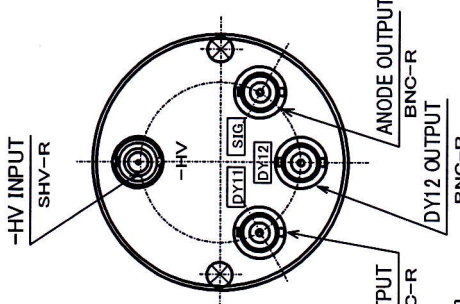
²Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH, Arzbergerstr. 10, D-82211 Herrsching am Ammersee, Germany

slow-Abgriff und an der Anode der sogenannte fast-Abgriff. Die Namen kommen durch die Länge der Abklingzeit der abgegriffenen Signale zustande, die beim slow-Abgriff im Verhältnis zum fast-Abgriff langsamer abfallen. Aufgrund dieser Eigenschaft ist der fast-Abgriff besonders gut für Zeitmessungen geeignet. Da es bei hohen Spannung vorkommen kann, dass der Elektronenfluss der ausgelösten Elektronen in eine Sättigung gelangt, kann es sein, dass der fast-Abgriff keine Signale liefert, die proportional zur Energie der einfallenden ionisierenden Teilchen sind. Daher wird für die Energiemessungen der slow-Abgriff verwendet. Da das Signal am slow-Abgriff früher aus dem Dynodensystem genommen wird, muss es im Gegensatz zum Signal des fast-Abgriffs nachträglich verstärkt werden.

This information is furnished for your information only.
 No warranty, expressed or implied, is Created by furnishing this information.



- R1,R21,R22:10 kΩ
 - R2,R5:120 kΩ
 - R3,R7-R12,R16:100 kΩ
 - R4,R6:180 kΩ
 - R13,R14,R17:150k Ω
 - R15:300 kΩ
 - R18-R20:51 Ω
 - C1:470 pF
 - C2-C4,C10-C13:0.01 μF
 - C5,C6:0.022 μF
 - C7:0.033 μF
 - C8,C9:4700 pF
- TOTAL RESISTANCE=2.16 MΩ
 DIVIDER CURRENT=1.38mA
 at -3000 V(MAX)



UNIT : mm
 DATE 11.Nov. 2009
 Ref:#1949-09111

H1949-50MOD
 WITH DYNODE11 OUTPUT

DIMENSIONAL OUTLINE AND VOLTAGE DIVIDER CIRCUIT

HAMAMATSU
 HAMAMATSU PHOTONICS K.K. Electron Tube Division

3 Detektoraufbau

Der Zusammenbau der Detektoren aus Szintillator und Sekundärelektronenvervielfacher geschieht bei abgedunkeltem Raum, um die Photokathode nicht zu überlasten.

Die Schutzkappe und die Schutzhülle des Szintillationszählers werden abgeschraubt. Mit Ethanol wird die Linse des Sekundärelektronenvervielfachers und die glatte Grundfläche des LYSO-Kristalls gereinigt. Die restlichen rauen Flächen des Kristalls werden vorsichtig mit Schmirgelpapier abgerieben, um eventuell vorhandene Verunreinigungen, zum Beispiel Fette, zu entfernen. Als nächstes wird die glatte Fläche des Kristalls auf das Einlassfenster des Sekundärelektronenvervielfachers gelegt. Da an den Grenzflächen Luft ist, wird durch den Grenzwinkel der Totalreflexion viel Szintillationslicht zurück in den Kristall reflektiert. Der Grenzwinkel tritt bei einem Übergang von Licht von einem optisch dichteren in ein optisch weniger dichtes Medium auf und hängt von dem Verhältnis der Brechungsindizes dieser Medien ab.

$$\Theta_C = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.1)$$

wobei n_1 der Brechungsindex des optisch dichteren Mediums und n_2 der des weniger optisch dichten Mediums ist. Luft hat einen Brechungsindex von ungefähr eins und LYSO von 1,81 [Cry08]. Totalreflexion tritt auf, sobald der Winkel des eintreffenden Lichtes größer als der Grenzwinkel ist. Damit dieser möglichst groß ist, wird zwischen Einlassfenster und Kristallfläche gleichmäßig Silikonöl verteilt, da dessen optischer Brechungsindex größer als der von Luft ist.

Um den Kristall wird Teflonband gelegt, damit das Szintillationslicht zurück in den Kristall reflektiert wird. Entweicht Szintillationslicht aus dem Kristall, wird die Effizienz des Detektors geringer. Es muss darauf geachtet werden, dass das Teflonband nicht das Silikonöl berührt, da es sonst transparent wird. Um das Teflonband wird Isolierband gewickelt, damit der Kristall fixiert wird und von äußeren Lichteinflüssen geschützt ist. Als letztes werden wieder die Schutzhülle und die Schutzkappe angebracht.

Auf den anderen Sekundärelektronenvervielfacher wird für Vergleichsmessungen ein CsF-Kristall montiert. Der Montageprozess ist sehr ähnlich. Da CsF jedoch hygroskopisch und deswegen gekapselt ist, wird es direkt mit Isolierband fixiert.

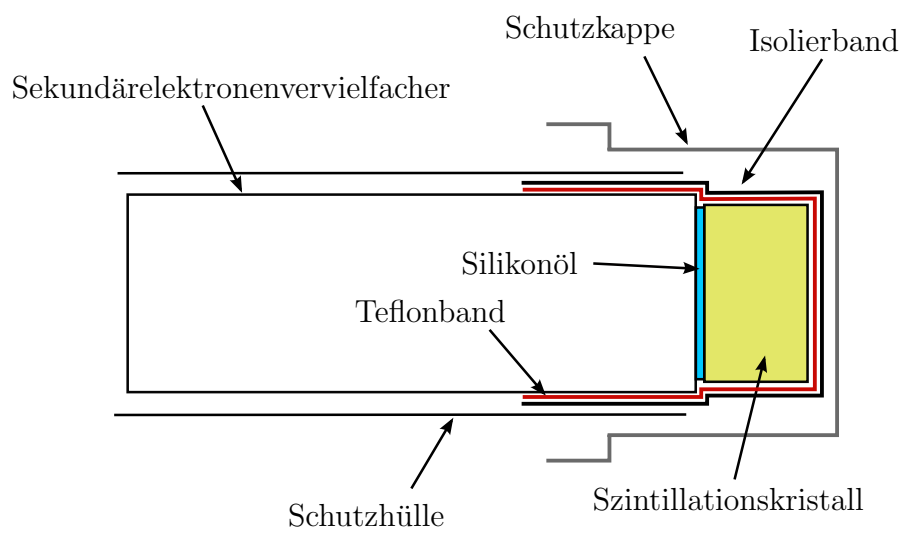


Abbildung 3.1: Aufbau des fertig montierten Szintillationsdetektors

4 Aufnahme von Energiespektren und Bestimmung der Energieauflösung

Um die drei Szintillationsmaterialien zu vergleichen, werden mit den drei Detektoren Energiespektren von ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba und ^{152}Eu aufgenommen. Zusätzlich muss auch der Untergrund aufgenommen werden, um von den aufgenommenen Spektren abgezogen zu werden. Hierzu werden die selbst montierten Detektoren mit CsF und LYSO und ein NaI-Detektor verwendet. Mit der 662 keV-Linie von ^{137}Cs wird die Energieauflösung der jeweiligen Detektoren bestimmt. Alle Szintillationskristalle werden mit einem H1949-50 Sekundärelektronenvervielfacher von *Hamamatsu* betrieben.

4.1 Versuchsaufbau

Die Detektoren werden mit einer Hochspannung auf 2,5 kV betrieben. Für die Aufnahme der Energiespektren wird aus genannten Gründen (Kapitel 2.2) das slow-Signal abgegriffen. Das Signal wird erst auf einen Vorverstärker und danach auf einen Verstärker geschickt. Das verstärkte Signal wird auf einen Vielkanalanalysator (Multi-Channel Analyser, MCA) mit integriertem Analog-Digital-Umwandler (Analog-to-Digital Converter, ADC) weitergeleitet. Der ADC wandelt die analogen Signale in digitale um. Der ADC und der MCA sind in einen Computer eingebaut. Die Spektren werden mit dem Programm *AccuSpec* aufgenommen.

4.2 Auswertung der Spektren

Mit den verschiedenen Szintillationsdetektoren werden Spektren von ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba und ^{152}Eu aufgenommen. Weil jede Probe unterschiedlich stark radioaktiv ist und wegen des durch das Lutetium verursachten Untergrundes des LYSO, wird die Totzeit bereinigte Messzeit gemessen. Die Totzeit ist die Zeitspanne, in der der Detektor kein weiteres Ereignis registrieren kann.

Um eine Energieeichung durchzuführen, werden Gaußkurven der Form:

$$f(x) = y_0 + \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-0,5 \cdot \left(\frac{x - x_c}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.1)$$

an die Messwerte angepasst. Dabei ist y_0 der Untergrund, A die Fläche unter der Kurve, σ die Standardabweichung und x_c der Linienschwerpunkt. Die Halbwertsbreite (full width at half maximum, FWHM) erhält man aus der Standardabweichung mit

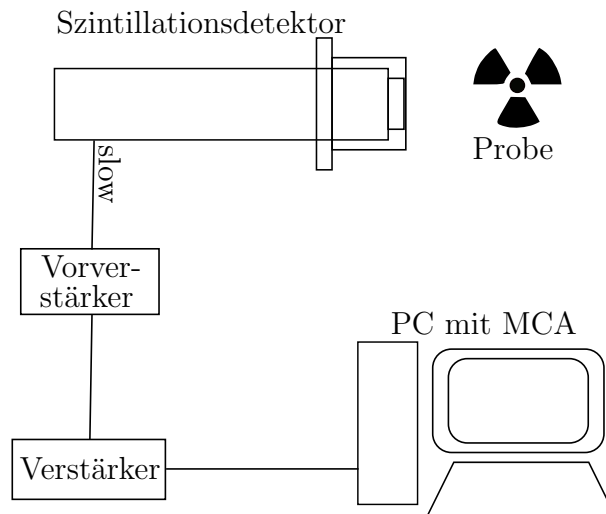


Abbildung 4.1: Slowkreis

$FWHM = 2\sigma\sqrt{2 \cdot \ln(2)}$. Aus der Halbwertsbreite und dem Linienschwerpunkt kann die Energieauflösung mit:

$$\text{Energieauflösung} = \frac{\text{Halbwertsbreite}}{\text{Linienschwerpunkt}} \quad (4.2)$$

berechnet werden. Diese wird anhand der 662 keV-Linie von ^{137}Cs bestimmt.

Die Verstärkung wird größer, je größer die Zählrate wird. Dies geschieht, weil bei dem geringen Sekundärelektronenvervielfacherstrom von einigen Milliampere, bei höherer Zählrate zu schnell zu viele Elektronen aus den Dynoden gelöst werden, so dass nicht ausreichend neue Elektronen nachkommen. Dadurch steigt das positive Potential der Dynoden und somit das Signal am Dynodenabgriff.

Diesem Effekt kann man entgegenwirken, indem die Zählrate verringert wird. Des Weiteren sollte man darauf achten, dass die Zählraten der verwendeten Proben nicht zu unterschiedlich sind.

4.2.1 Lutetiumyttriumsilikatoxid

Beim Abzug des LYSO-Untergrundes fällt besonders bei ^{60}Co auf, dass das Untergrundspektrum zum Spektrum von einer Probe um ein paar Kanäle verschoben ist. Dies hängt, wie oben beschrieben, von der Zählrate ab. Durch eine Verringerung der Zählrate, lässt sich der Effekt verringern, aber nicht komplett eliminieren.

Die Energieauflösung wird anhand der 662 keV-Linie von ^{137}Cs mit der Gaußfunktion 4.1 bestimmt. Sie beträgt 10,662(17) %. Der angegebene Wert von des Herstellers von 7,1 % wird nicht erreicht. Dies kann daran liegen, dass der Hersteller einen besseren Reflektor

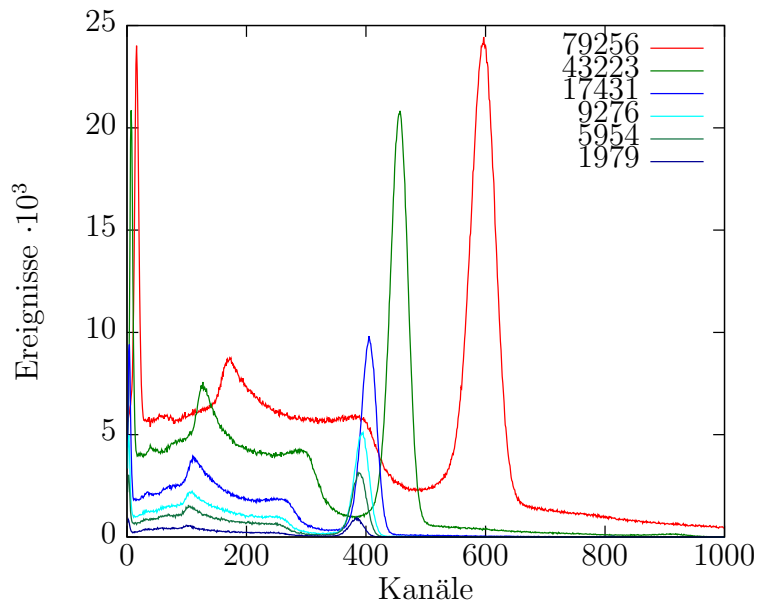


Abbildung 4.2: Spektrum von ^{137}Cs mit unterschiedlichen Zählraten ($\frac{\text{Ereignisse}}{s}$). Aufgenommen mit dem NaI-Detektor mit einer Minute Messzeit

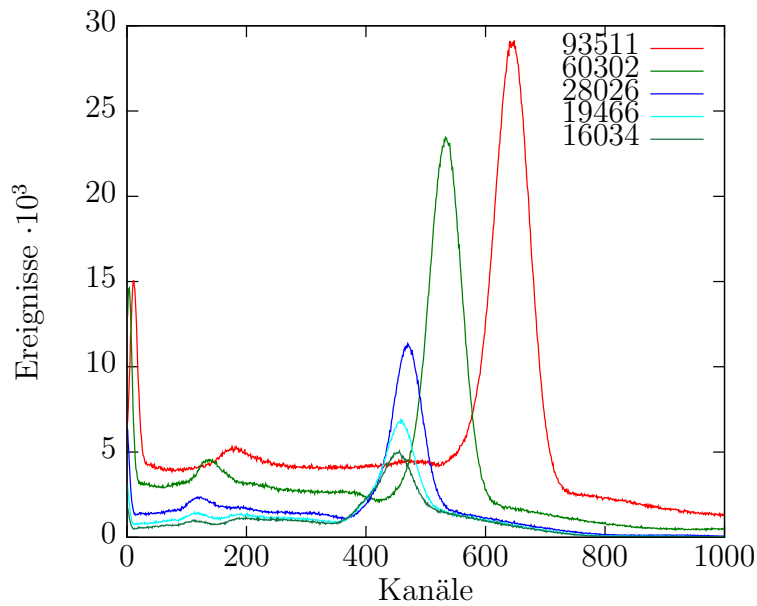


Abbildung 4.3: Spektrum von ^{137}Cs mit unterschiedlichen Zählraten ($\frac{\text{Ereignisse}}{s}$). Aufgenommen mit dem LYSO-Detektor mit einer Minute Messzeit

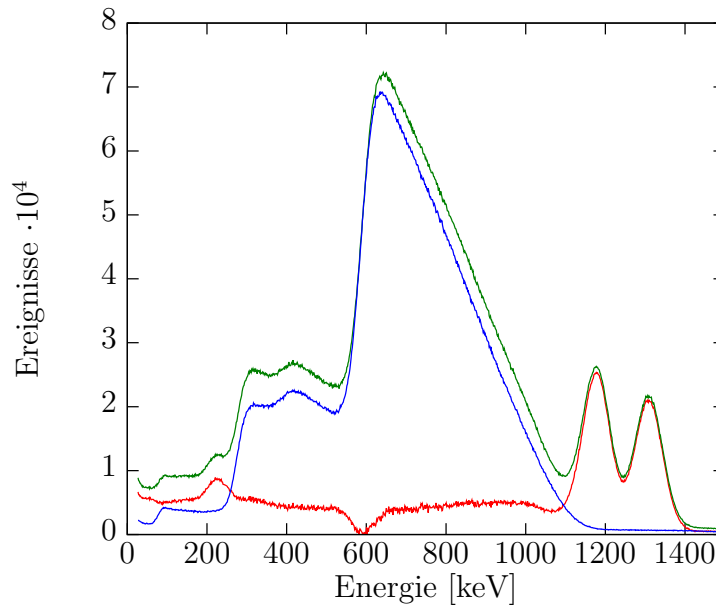


Abbildung 4.4: ^{60}Co -Spektrum aufgenommen mit dem LYSO-Detektor. In grün ist die Messung, in blau der gemessene Untergrund und in rot die untergrund-korrigierte Messung markiert.

benutzt hat als Teflonband oder dass trotz der gewissenhaften Reinigung der Kristalle deren Oberfläche störende Partikel aufweist. Die mit dem anderen LYSO-Kristall durchgeführten Messungen reproduzieren die des ersten und sind deswegen nicht aufgeführt.

4.2.2 Caesiumfluorid

Für diese Messung wird der Szintillationsdetektor mit einem CsF-Kristall verwendet. Es werden die Energiespektren von ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba und ^{152}Eu aufgenommen. Die Energieauflösung wird für die 662 keV-Linie von ^{137}Cs bestimmt und beträgt 21,13(12) %.

4.2.3 Natriumiodid

Für diese Messung wird ein Szintillationsdetektor aus dem Praktikumsversuch „Gamaspektroskopie“ verwendet. Dieser wird auch mit dem Sekundärelektronenvervielfacher H1949-50 von *Hamamatsu* betrieben. Auch hier werden die Energiespektren von ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba und ^{152}Eu aufgenommen. Die Energieauflösung wird für die 662 keV Linie von ^{137}Cs bestimmt und beträgt 7,03(4) %.

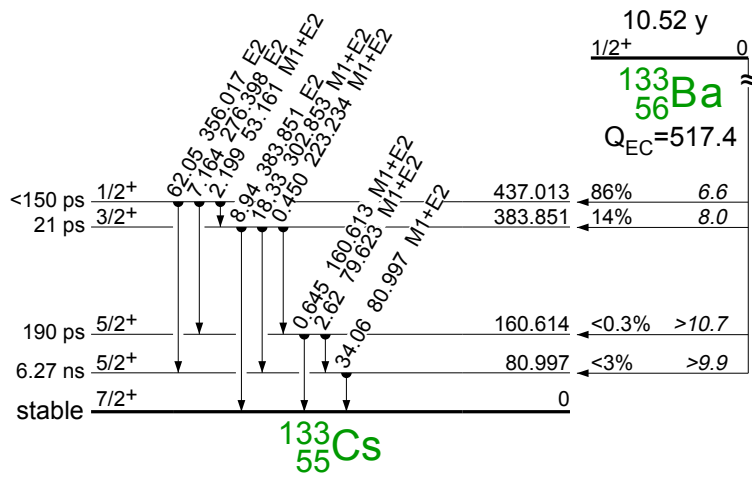


Abbildung 4.5: Zerfallsschema von ^{133}Ba [Fir96]

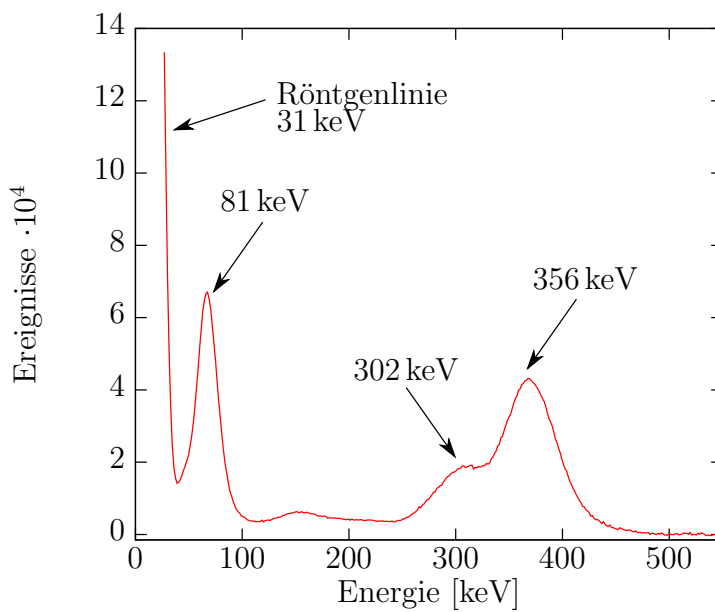


Abbildung 4.6: γ -Spektrum von ^{133}Ba mit dem LYSO-Detektor aufgenommen. Die Röntgenlinie am linken Rand ist zugunsten der Übersicht abgeschnitten worden.

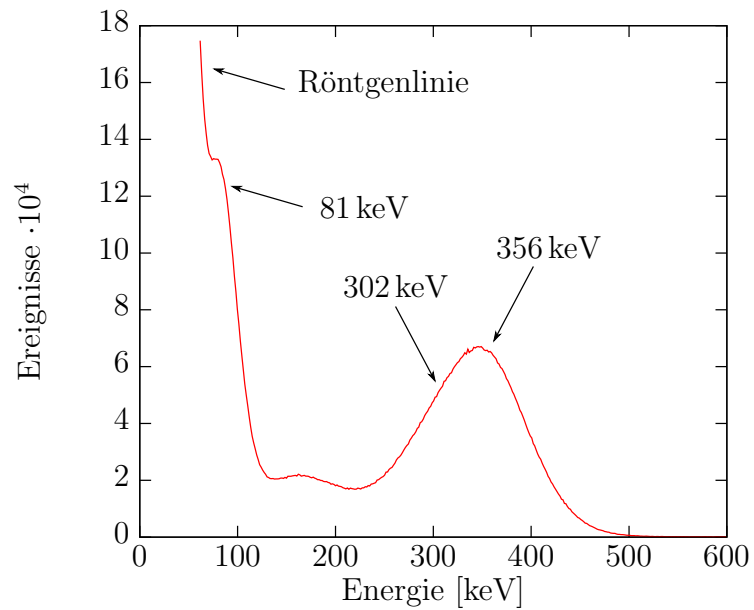


Abbildung 4.7: γ -Spektrum von ^{133}Ba aufgenommen mit dem CsF-Detektor. Durch die schlechte Energieauflösung ist es nicht mehr möglich, die 302 keV- und 356 keV-Linie zu trennen. Die Röntgenlinie am linken Rand ist zugunsten der Übersicht abgeschnitten worden.

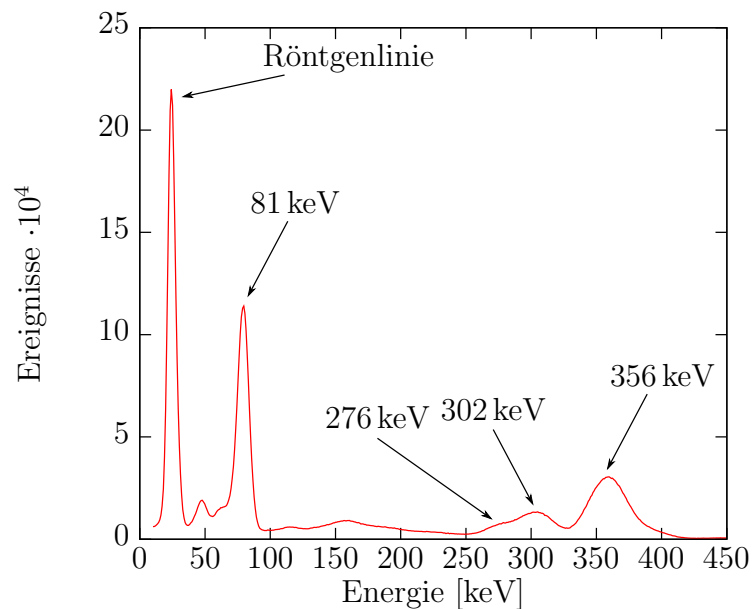


Abbildung 4.8: γ -Spektrum von ^{133}Ba aufgenommen mit dem NaI-Detektor

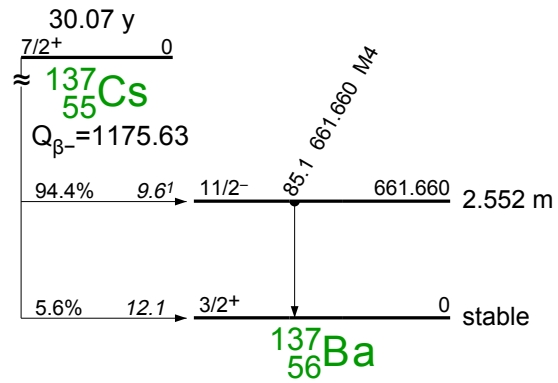


Abbildung 4.9: Zerfallsschema von ^{137}Cs aus [Fir96]

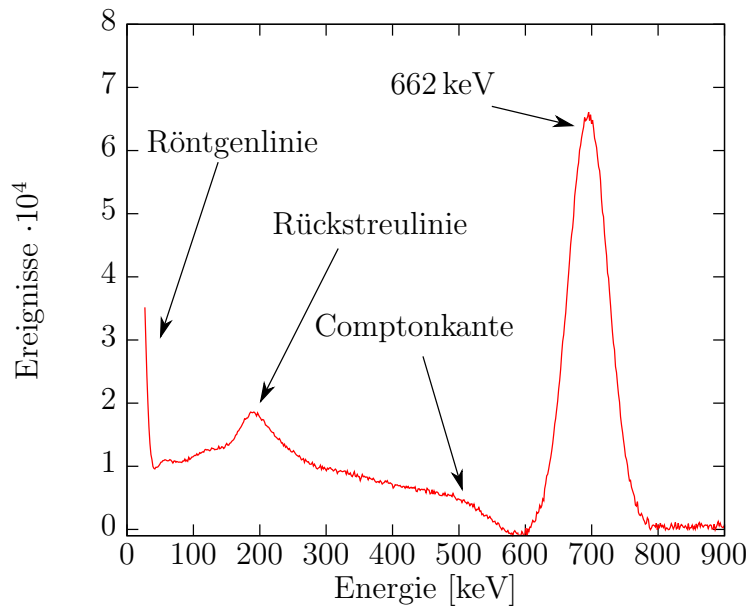


Abbildung 4.10: γ -Spektrum von ^{137}Cs mit dem LYSO-Detektor aufgenommen.

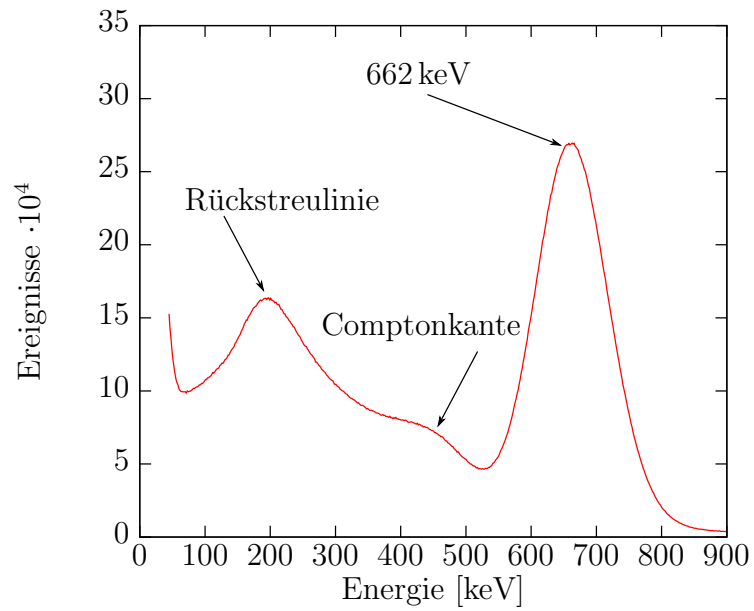


Abbildung 4.11: γ -Spektrum von ^{137}Cs aufgenommen mit dem CsF-Detektor.

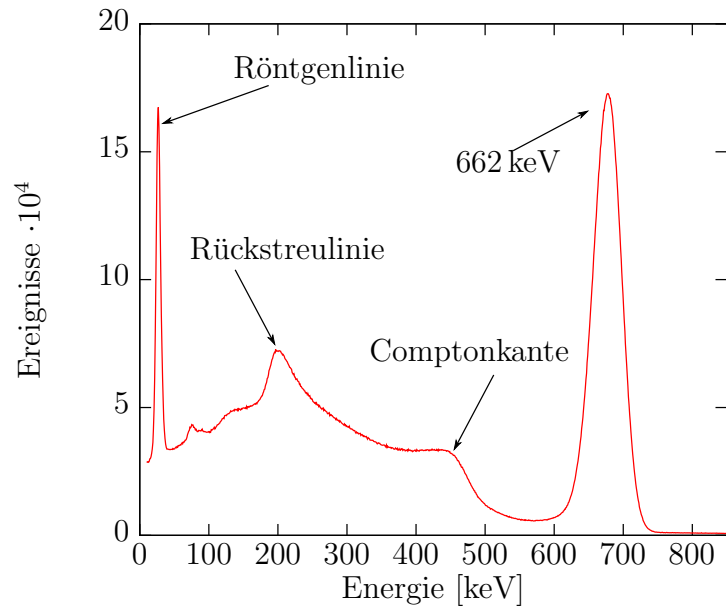


Abbildung 4.12: γ -Spektrum von ^{137}Cs aufgenommen mit dem NaI-Detektor.

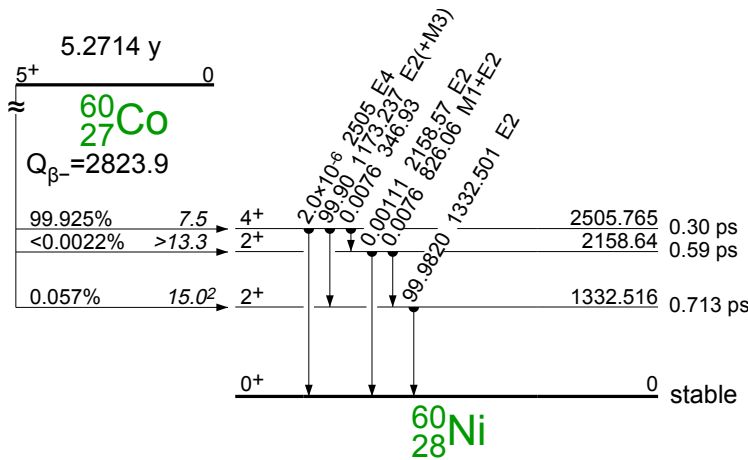


Abbildung 4.13: Zerfallsschema von ^{60}Co aus [Fir96]

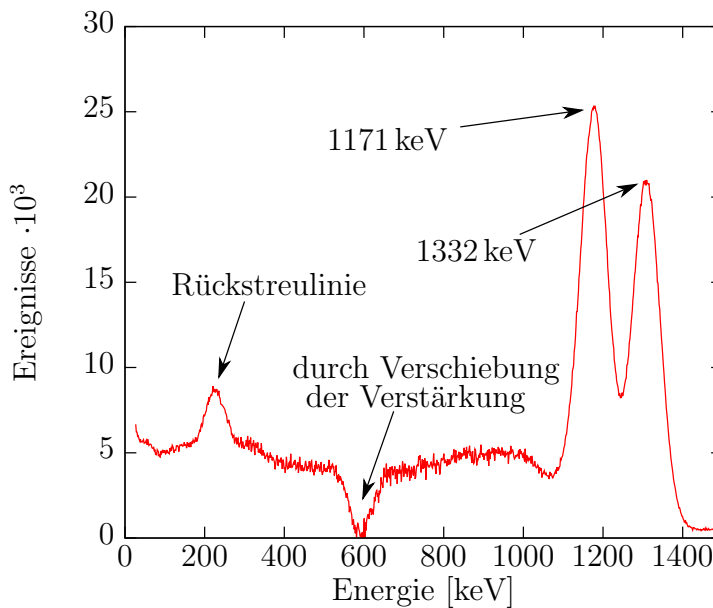


Abbildung 4.14: γ -Spektrum von ^{60}Co mit dem LYSO-Detektor aufgenommen. Durch die Abhängigkeit der Verstärkung von der Zählrate kann der Untergrund nicht mehr ganz genau abgezogen werden und es entsteht eine invertierte linieähnliche Form im Spektrum.

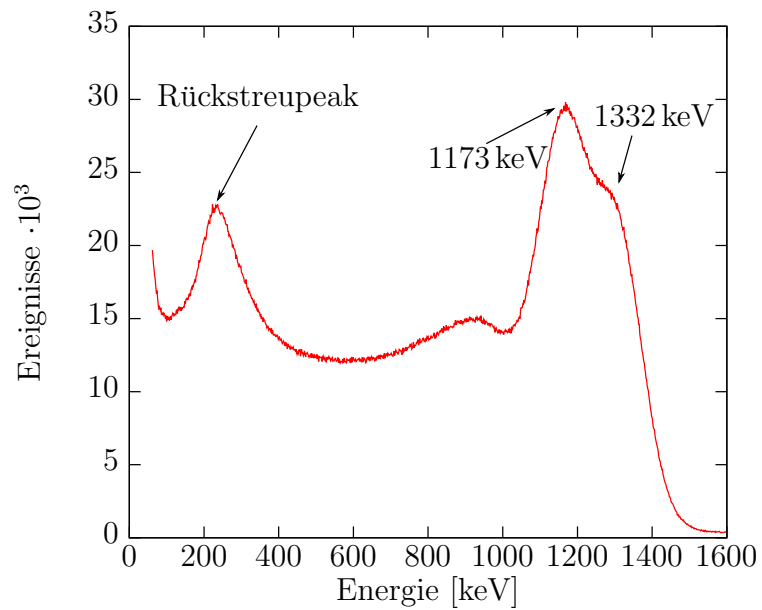


Abbildung 4.15: γ -Spektrum von ^{60}Co aufgenommen mit CsF-Detektor. Aufgrund der schlechten Energieauflösung von CsF sind die Linien kaum noch getrennt auflösbar.

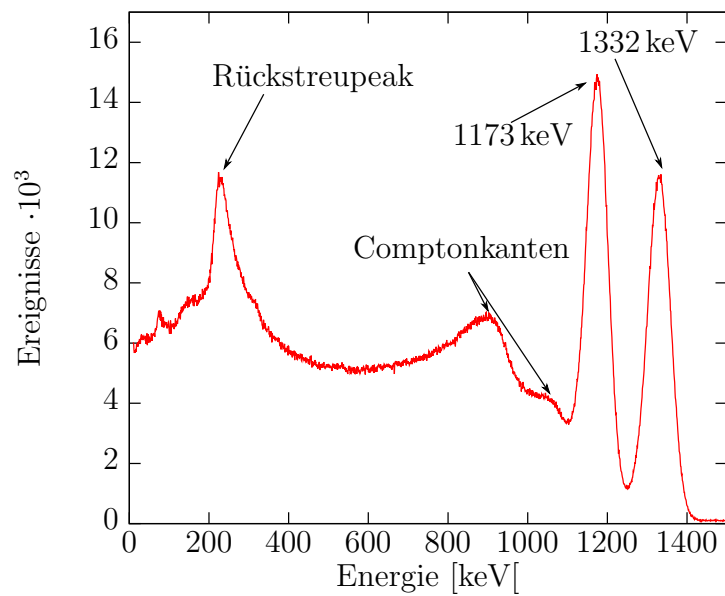


Abbildung 4.16: γ -Spektrum von ^{60}Co aufgenommen mit NaI-Detektor.

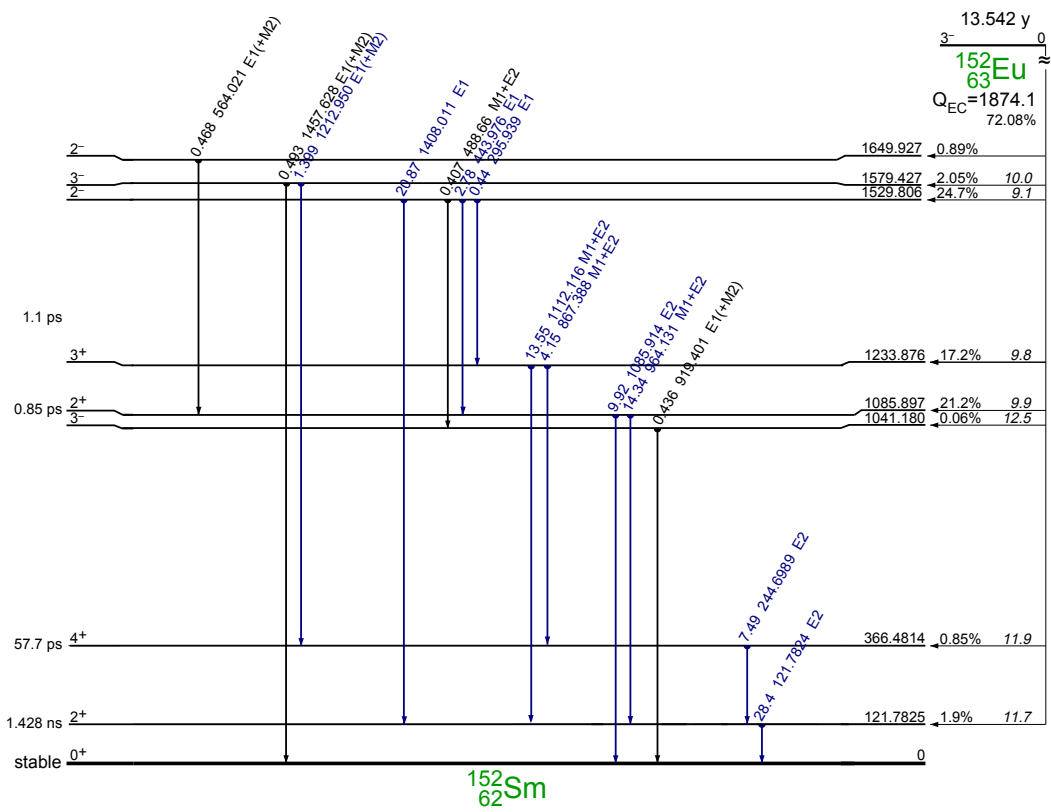


Abbildung 4.17: Zerfallsschema von ^{152}Eu mit Elektroneneinfang nach [Fir96]

4 Aufnahme von Energiespektren und Bestimmung der Energieauflösung

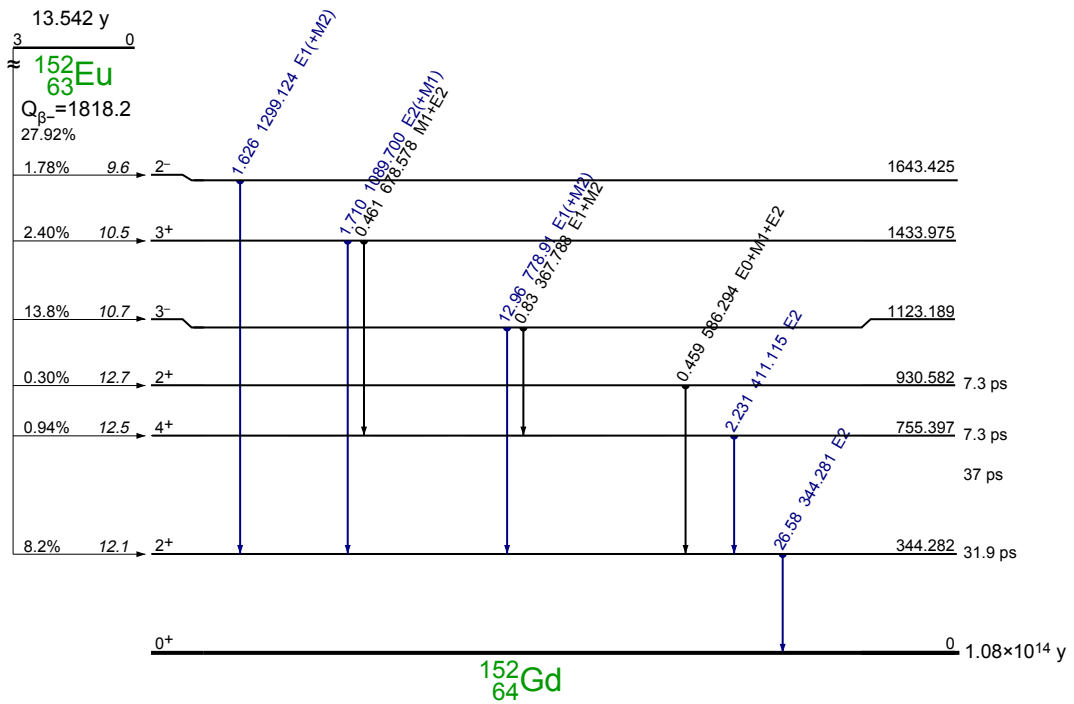


Abbildung 4.18: Zerfallsschema nach dem β -Zerfalls von ^{152}Eu nach [Fir96]

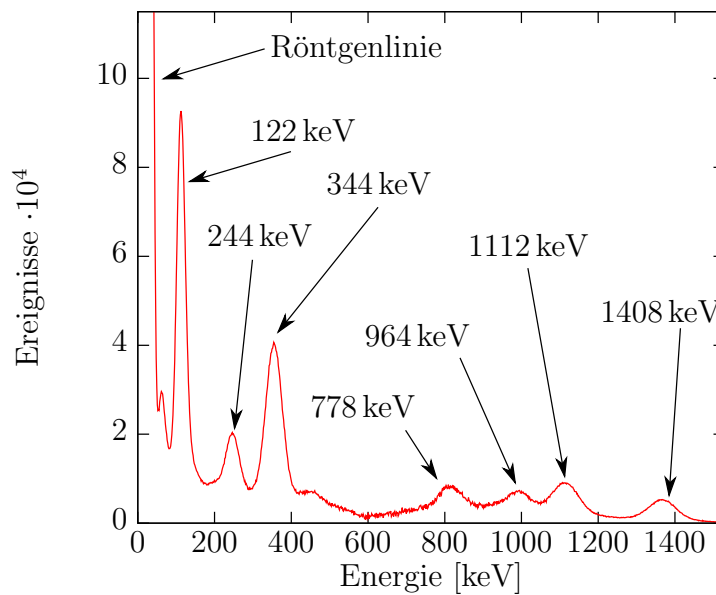


Abbildung 4.19: Spektrum von ^{152}Eu aufgenommen mit dem LYSO-Detektor. Die Röntgenlinie am linken Rand ist abgeschnitten.

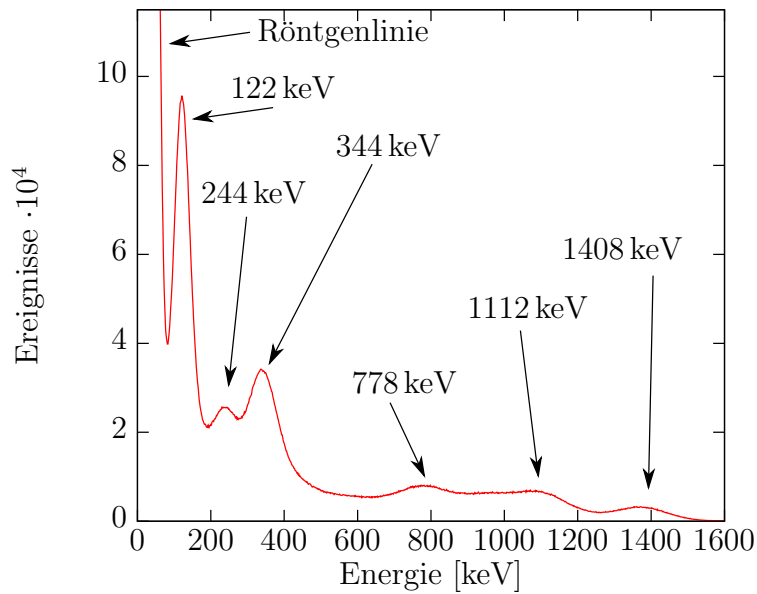


Abbildung 4.20: γ -Spektrum von ^{152}Eu . Aufgenommen mit CsF. Die Röntgenlinie am linken Rand ist abgeschnitten.

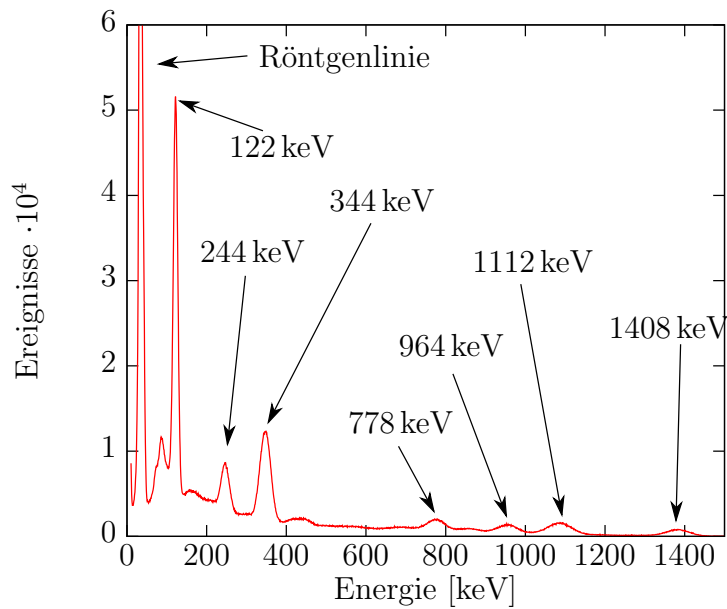


Abbildung 4.21: γ -Spektrum von ^{152}Eu aufgenommen mit NaI. Die Röntgenlinie am linken Rand ist abgeschnitten.

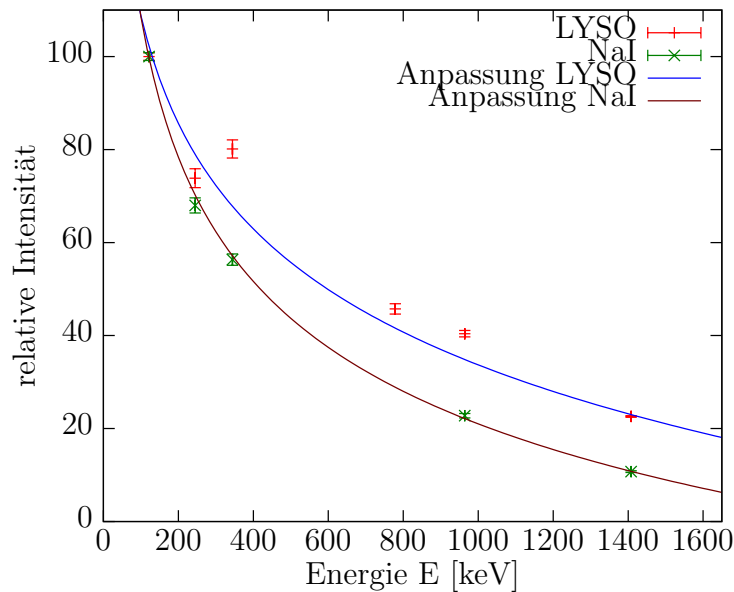


Abbildung 4.22: Vergleich der relativen Nachweiswahrscheinlichkeiten von NaI und LYSO

4.3 Relative Nachweiswahrscheinlichkeit von Natriumiodid und Lutetiumyttriumsilikatoxid

Mit dem aufgenommenen ^{152}Eu -Spektrum wird für den NaI- und LYSO-Detektor die relative Nachweiswahrscheinlichkeit bestimmt. Hierzu wird das Verhältnis aus experimenteller und theoretischer Linienintensität genommen. Die experimentelle Linienintensität erhält man aus den Flächen unter den Linien, welche mit der Gaußfunktion 4.1 bestimmt werden. Um das Verhältnis nehmen zu können, werden theoretische und experimentelle Linienintensitäten auf eine Linie normiert. An diese Werte wird nun zur Visualisierung eine Exponentialfunktion angepasst (Abb. 4.22).

Aufgrund seiner größeren Dichte und Kernladungszahl hat LYSO in hohen Energiebereichen eine größere relative Nachweiswahrscheinlichkeit als NaI. Dadurch ist es gut zur Analyse von Linien mit hohen Energien geeignet.

4.4 Vergleich der drei Szintillationsmaterialien

Die Messungen bestätigen, dass NaI mit 7,03(4) % die beste Energieauflösung der drei getesteten Detektoren besitzt. Die Lichtausbeute hat darauf einen entscheidenden Einfluss. Aber auch LYSO eignet sich mit einer Energieauflösung von 10,662(17) % gut zum Aufnehmen von γ -Spektren und ist durch seine bessere relative Nachweiswahrscheinlichkeit als NaI besser zur Analyse von Linien mit hohen Energien geeignet. Der Aufwand

4.4 Vergleich der drei Szintillationsmaterialien

der Auswertung steigt jedoch durch seinen Untergrund. CsF besitzt mit 21,13(12)% die schlechteste Energieauflösung der drei Szintillatoren und ist eher für Zeitmessungen geeignet.

5 Zeitauflösung und Lebensdauerermessung

Als nächstes soll die Zeitauflösung der beiden LYSO-Szintillationsdetektoren und die Lebensdauer eines angeregten Kernzustandes von ^{133}Cs gemessen werden. Hierzu wird der Aufbau des Versuches „Nukleare Elektronik“ aus dem physikalischen Praktikum V genutzt. Die dort verwendeten NaI-Detektoren sollen durch die LYSO-Detektoren ersetzt werden. Zum Vergleich werden die Messungen erst mit den NaI-Detektoren durchgeführt.

5.1 Versuchsaufbau

Für die Messungen wird ein fast-slow-Koinzidenzkreis (Abb. 5.1) verwendet. Die beiden Detektoren sind in einem Winkel von 180° aufgestellt und an beiden wird ein Signal jeweils am slow- als auch am fast-Ausgang abgegriffen. Das Hochspannungsmodul ist auf seinen Maximalausgangswert von 2 kV gestellt.

Der fast-slow-Koinzidenzkreis besteht aus einem slow-Kreis und einem fast-Kreis. Der fast-Kreis ist für die Zeitmessung und der slow-Kreis für die Selektion der für die Messung verwendeten Energiebereiche verantwortlich.

Für den fast-Kreis werden die Anodensignale der Sekundärelektronenvervielfacher verwendet. Er besteht aus zwei Verzögerungen (V1 und V2), zwei CFDs (constant fraction discriminator) und einem Zeit-Amplituden-Umwandler (time-to-amplitude converter, TAC). Die Anodensignale werden jeweils über einen CFD verarbeitet. Wenn die Signalhöhe eine am CFD einstellbare Schwelle überschreitet, gibt dieser eine logische Eins aus. Der Startpunkt des vom CFDs ausgegebenen NIM-Signals (Nuclear Instrumentation Module) wird durch einen festen Anteil der Eingangsamplitude festgelegt. Hierdurch ist der Zeitpunkt, an dem der CFD ein Signal ausgibt, unabhängig von der Signalhöhe. Dies ist von großer Bedeutung, da der fast-Kreis für die Zeitmessung verantwortlich ist. Die Signale der CFDs werden auf den TAC geleitet. Dieser besitzt einen Start- und einen Stoppeingang. Der TAC gibt Spannungspulse aus, die proportional zur Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen des Start- und Stoppsignals sind. Somit kann man Zeitdifferenzen in einem Spektrum darstellen. Das Signal, das am Stoppeingang des TAC angeschlossen ist, wird verzögert (V1).

Für den slow-Kreis werden die Signale der elften Dynode verwendet. Dieser besteht aus zwei Vorverstärkern, zwei Verstärkern, zwei Einkanalanalysatoren (single channel analyser, SCA) einer Koinzidenzeinheit und einem „Gate and Delay Generator“. Mit Vorverstärker und Verstärker werden die Dynodensignale so verstärkt, dass sie weiterverarbeitet werden können. Von hier aus werden sie auf die SCAs geleitet. Die SCAs haben eine einstellbare obere und untere Schwelle für die Eingangssignale. Sie geben nur eine logische Eins aus, wenn das Eingangssignal zwischen den Schwellen liegt. Die Schwellen

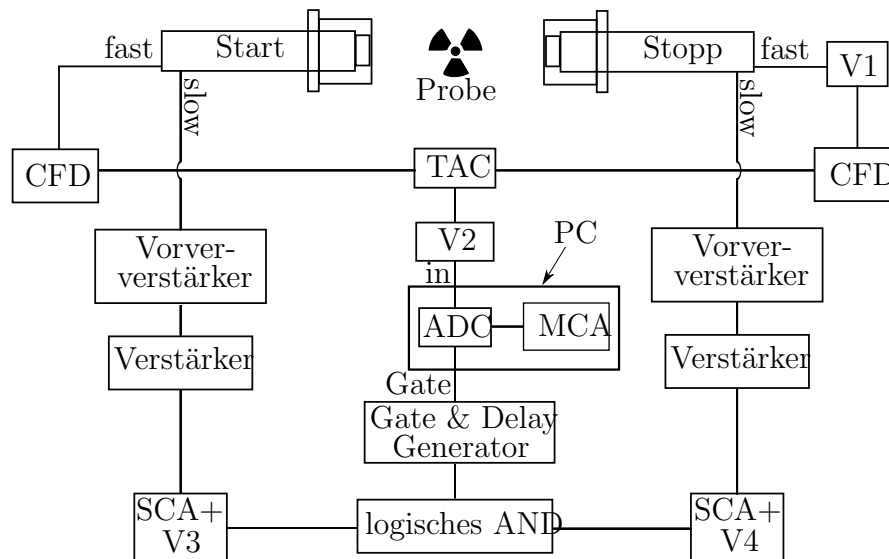


Abbildung 5.1: fast-slow-Koinzidenzkreis

werden so eingestellt, dass sie auf den Energiebereichen, der zu messenden γ -Quanten, des Start- und Stoppsignals aus dem fast-Kreis liegen. Die Signale der SCAs werden auf eine Koinzidenzeinheit geleitet, diese führt eine logische AND-Operation durch und gibt nur dann eine logische Eins aus, wenn sich die Signale der SCAs zeitlich überlappen. Auf die Koinzidenzeinheit folgt ein „Gate and Delay Generator“, welcher das Signal verbreitert und einstellbar verzögert.

Der Ausgang des TAC aus dem fast-Kreis wird an den Eingang eines ADCs und der Ausgang des „Gate and Delay Generators“ aus dem slow-Kreis an das Gate des selben ADCs angeschlossen. Nur wenn am Gate des ADCs eine logische Eins anliegt, wird ein Signal am Eingang registriert. Da der slow-Kreis nur logische Einsen liefert, wenn die Energien der einfallenden γ -Quanten innerhalb der eingestellten Schwellen der SCAs liegen, werden auch fast-Signale nur in diesen Energiebereichen vom ADC registriert. Der ADC ist in einer MCA-Karte integriert und die MCA-Karte in einem PC eingebaut. Mit diesem werden die Zeitspektren aufgenommen.

5.2 Durchführung

Es soll die Zeitauflösung der Detektoren und die Lebensdauer des 81 keV-Zustandes von ^{133}Cs gemessen werden. ^{133}Ba zerfällt über Elektroneneinfang mit einer Wahrscheinlichkeit von 86 % in den 437 keV-Zustand des ^{133}Cs . Dieser zerfällt durch aufeinander folgende Emission von γ -Quanten mit der Energie von 356 keV und 81 keV in den Grundzustand (vgl. Abb. 4.2.3). Als Startsignal wird das Signal des 356 keV γ -Quanten und als Stoppsignal des 81 keV γ -Quanten genommen. Zuerst müssen alle Kreise koinzident

zueinander eingestellt werden. Für die NaI-Detektoren wird eine ^{22}Na Quelle und für die LYSO-Detektoren ihr eigener Untergrund verwendet. ^{22}Na emittiert β^+ -Strahlung, welche mit Elektronen zu Photonen annihiliert. Diese bewegen sich in einem 180° -Winkel auseinander und werden von den Detektoren koinzident detektiert. Sie besitzen die Ruheenergie eines Elektrons beziehungsweise Positrons, welche 511 keV beträgt. Der Untergrund des LYSOs kann verwendet werden, da alle γ -Zerfälle von ^{176}Lu koinzident ablaufen (vgl. Abb. 4.4)

Die Fenster der SCAs werden für die NaI-Detektoren auf die 511 keV Linie der Elektron-Positron-Annihilation des ^{22}Na eingestellt. Für die LYSO-Detektoren werden sie direkt auf die Linien der nachher zu messenden Lebensdauer von ^{133}Cs eingestellt. Als nächstes werden die Signale der SCAs auf einem Oszilloskop betrachtet und mit V3 und V4 so eingestellt, dass die Signale sich überlappen. Danach werden die Schwellen der CFDs so eingestellt, dass Rauschen herausgefiltert wird. Dann wird das Ausgangssignal des TAC am Oszilloskop betrachtet. An V1 wird eine Verzögerung von 50 ns eingestellt, so dass das resultierende Ausgangssignal ungefähr 4 V groß ist. Hierdurch wird der Zeitnullpunkt in die Mitte des Spektrums verschoben, damit keine Ereignisse abgeschnitten werden. Jetzt werden „Gate and Delay Generator“ und V2 so eingestellt, dass die Endsignale von slow-Kreis und fast-Kreis überlappen.

Mit dem fast-slow-Koinzidenzkreis können jetzt Promptkurven aufgenommen werden. Hierzu wird bei den NaI-Detektoren ^{22}Na verwendet und bei LYSO der Untergrund des Lutetium. Eine Zeitkalibrierung wird durchgeführt, indem V1 in Schritten von 16 ns von 18 ns bis 82 ns variiert wird. Für die Lebensdauerermessung müssen die SCAs bei den NaI-Detektoren auf die Energien 356 keV und 81 keV eingestellt werden.

5.3 Auswertung

An die gemessenen Promptkurven wird die Gaußfunktion 4.1 angepasst. An die fünf Linienschwerpunkte der Promptkurven wird eine Gerade angepasst. Aus dessen Steigung kann bestimmt werden, wie das Verhältnis von Kanäle und Zeit in Nanosekunden ist. Die Halbwertsbreite der Gaußkurven ist die Zeitauflösung. Aus den fünf Halbwertsbreiten wird der gewichtete Mittelwert berechnet und mit der Zeitkalibrierung die Kanäle in Nanosekunden umgerechnet.

Aus der Lebensdauerermessung erhält man eine exponentiell abfallende Kurve, an die die Zerfallsfunktion

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (5.1)$$

angepasst werden kann. Hierbei ist N_0 die Zahl der am Anfang vorhandenen Zerfälle, t_0 die künstlich hervorgerufene Verzögerung durch V1 und τ die Zerfallskonstante. Aus dieser lässt sich die Halbwertszeit berechnen:

$$t_{1/2} = \ln(2) \cdot \tau \quad (5.2)$$

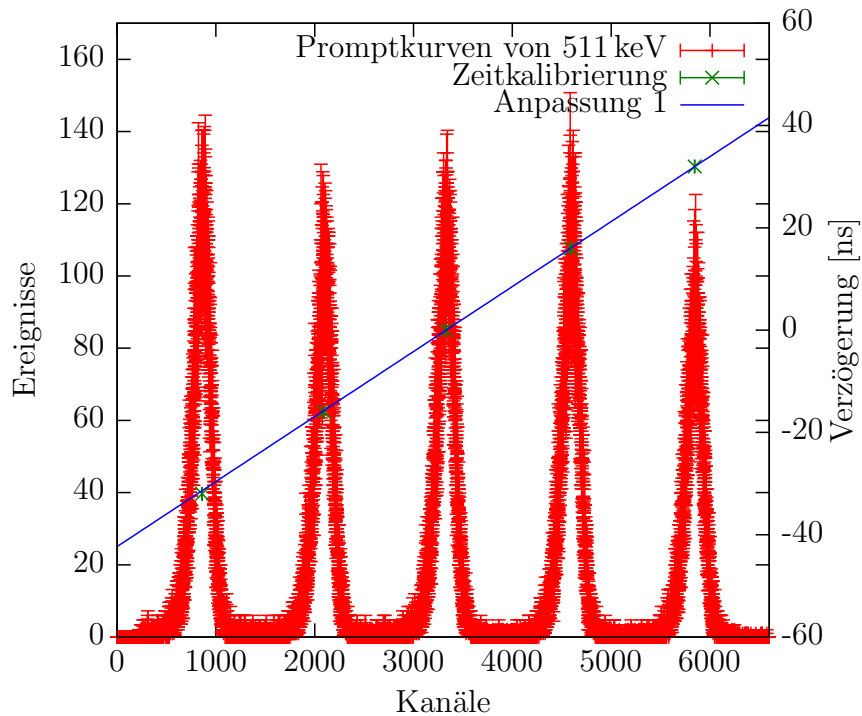


Abbildung 5.2: Promptkurven mit Verzögerung V1 von 18 ns bis 82 ns und Zeitkalibrierung aufgenommen mit dem NaI-Detektor.

5.3.1 Natriumiodid

Als erstes werden die Messungen mit den NaI-Detektoren durchgeführt. Da einer der Detektoren ein sehr schwaches Signal ausgibt, ist es sehr schwer, den fast-slow-Kreis koinzident zu stellen und die Lebensdauermessung durchzuführen. Aus diesem Grund werden bei der Lebensdauermessung trotz sehr langer Messzeiten wenige Ereignisse registriert.

Als Zeitkalibrierung ergibt sich:

$$f(\text{Kanäle}) = 0,012832(4) \cdot \frac{\text{ns}}{\text{Kanäle}} - 42,91(17) \text{ ns} \quad (5.3)$$

Zusätzlich zum Fehler der Anpassung kann ein Fehler von 1 % aufgrund der Genauigkeit der Verzögerungen angenommen werden [Via]. Im Vergleich zum Fehler der Anpassung ist dieser viel größer, deswegen wird der Fehler der Anpassung vernachlässigt:

$$f(\text{Kanäle}) = 0,01284(13) \cdot \frac{\text{ns}}{\text{Kanäle}} - 42,91(17) \text{ ns} \quad (5.4)$$

Aus den fünf Halbwertsbreiten wird der gewichtete Mittelwert berechnet und mit der Zeitkalibrierung in Nanosekunden umgerechnet.

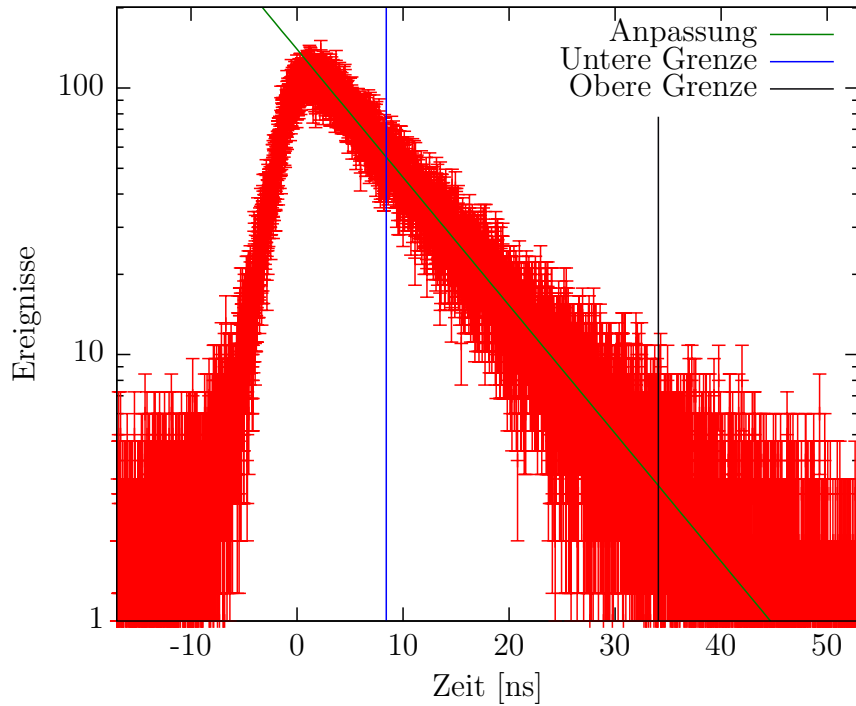


Abbildung 5.3: Zerfallskurve des 81 keV-Zustandes mit NaI-Detektor in halblogarithmischer Darstellung. Die Messdauer beträgt 8,64 Stunden

$$\text{FWHM} = \Delta t = 2,696(29) \text{ ns} \quad (\text{bei } 511 \text{ keV}) \quad (5.5)$$

Für die Zerfallskonstante und die Halbwertszeit erhält man mit 5.1, 5.2 und der Zeitkalibrierung 5.3:

$$\begin{aligned} \tau &= 9,03(12) \text{ ns} \\ t_{1/2} &= 6,26(9) \text{ ns} \end{aligned}$$

Vergleicht man diese mit dem Literaturwert $6,283(14) \text{ ns}$ [Kha11], stimmt sie im Rahmen der Fehler mit diesem überein.

5.3.2 Lutetiumyttriumsilikatoxid

Nun werden die NaI-Detektoren gegen die LYSO-Detektoren ausgetauscht. Für die Zeitkalibrierung erhält man:

$$f(\text{Kanäle}) = 0,02538(6) \cdot \frac{\text{ns}}{\text{Kanäle}} - 43,98(13) \text{ ns} \quad (5.6)$$

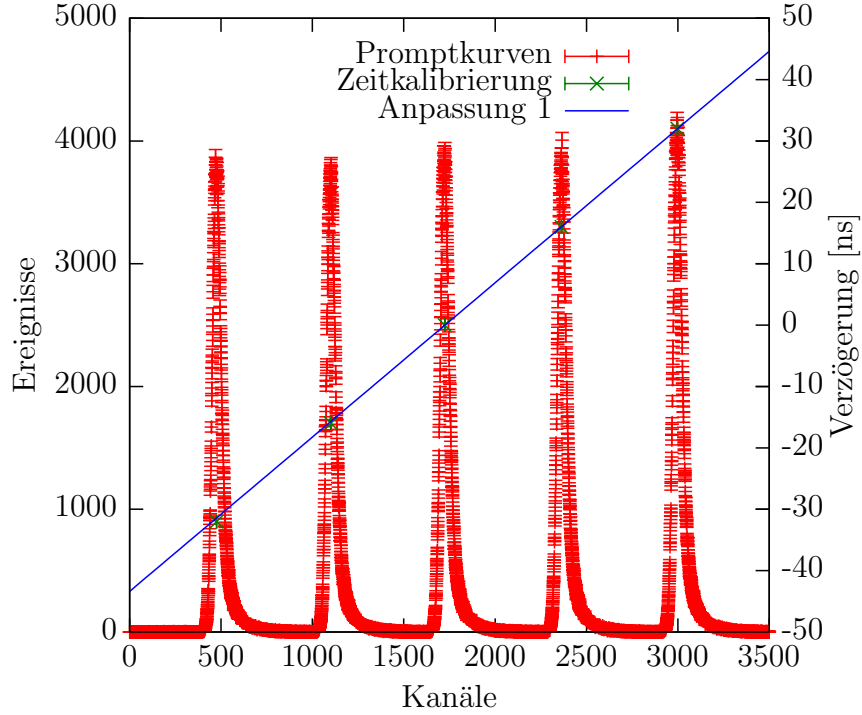


Abbildung 5.4: Promptkurven aufgenommen mit LYSO und Zeitkalibrierung. Die asymmetrische Form kommt durch den Zerfall der 88 keV Linie des Lutetium. Die Messzeit beträgt 76 Stunden.

Auch hier kann zusätzlich zum Fehler der Anpassung ein Fehler von 1 % angenommen [Via] und der Fehler der Anpassung vernachlässigt werden:

$$f(\text{Kanäle}) = 0,02538(26) \cdot \frac{\text{ns}}{\text{Kanäle}} - 43,98(13) \text{ ns} \quad (5.7)$$

Zusätzlich wird die Zeitkalibrierung mit einem Flugzeiteichgenerator durchgeführt. Bei diesem wird auch ein Fehler von 1 % angenommen:

$$f(\text{Kanäle}) = 0,02561(26) \cdot \frac{\text{ns}}{\text{Kanäle}} - 43,98(13) \text{ ns} \quad (5.8)$$

Aus den Halbwertsbreiten der Promptkurven wird die Zeitauflösung (zwischen 80 keV und 356 keV) berechnet. Einmal mit der Zeitkalibrierung von den Promptkurven und einmal mit der von dem Flugzeiteichgenerator. Daraus wird dann der gewichtete Mittelwert berechnet:

$$\begin{aligned} \text{FWHM}_{\text{prompt}} &= \Delta t_{\text{prompt}} = 1,304(14) \text{ ns} \\ \text{FWHM}_{\text{zeiteich}} &= \Delta t_{\text{zeiteich}} = 1,316(14) \text{ ns} \\ \text{FWHM}_{\text{gesamt}} &= \Delta t_{\text{gesamt}} = 1,308(10) \text{ ns} \end{aligned} \quad (5.9)$$

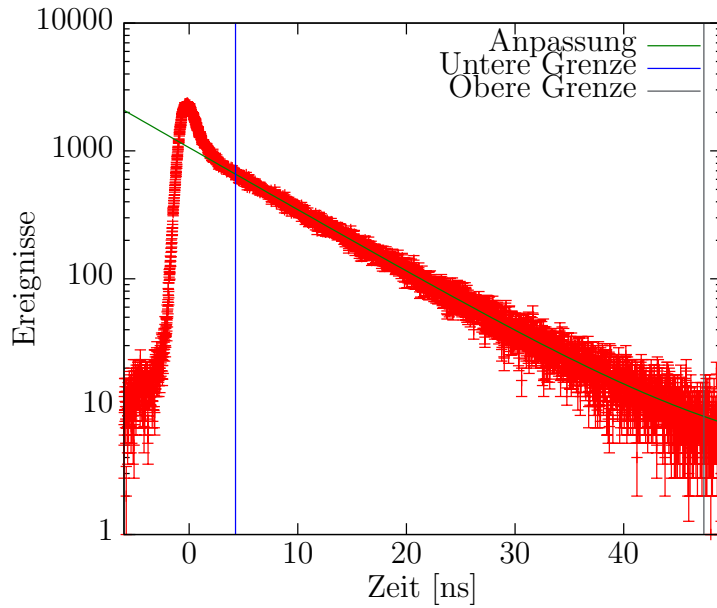


Abbildung 5.5: Zerfallskurve des ^{137}Cs -Zustandes mit überlagerter Promptkurve und Zerfallskurve des 88 keV-Zustandes des Lutetiumuntergrundes in halb-logarithmischer Darstellung. Die Messdauer beträgt 1,73 Stunden.

Bei der Zerfallskurve des 81 keV-Zustandes ist der prompte Untergrund des Lutetiums überlagert. Dieser wird nicht mit angepasst. Es wird auch der Zerfall der 88 keV Linie des Lutetiums mitgemessen. Da die Rate des prompten Untergrundes auf den eingestellten Energiefenstern des ^{137}Cs verhältnismäßig klein ist zur Rate der Lebensdauerermessung des 81 keV-Zustandes von ^{137}Cs , kann man dies vernachlässigen.

An die Zerfallskurve wird wieder eine exponentielle Zerfallsfunktion (Abb. 5.1) angepasst. Die dadurch erhaltene Zerfallskonstante beträgt:

$$\tau_{\text{prompt}} = 8,96(10) \text{ ns} \quad (5.10)$$

$$\tau_{\text{zeiteich}} = 9,05(10) \text{ ns} \quad (5.11)$$

Mit Gleichung 5.2 lässt sich wieder die Halbwertszeit berechnen:

$$t_{\text{prompt},1/2} = 6,21(7) \text{ ns} \quad (5.12)$$

$$t_{\text{zeiteich},1/2} = 6,27(7) \text{ ns}$$

$$t_{\text{gesamt},1/2} = 6,24(5) \text{ ns} \quad (5.13)$$

$$t_{\text{lit},1/2} = 6,283(14) \text{ ns} \quad (5.14)$$

Die berechnete Lebensdauer aus der Zeitkalibrierung mit den Promptkurven und dem

Flugzeiteichgenerator passen im Rahmen ihrer Fehler mit dem Literaturwert $6,283(14)$ ns [Kha11] überein.

5.4 Vergleich von Lutetiumyttriumsilikatoxid und Natriumiodid

Beide Messungen bestätigen den Literaturwert für die Lebensdauer des 81 keV-Zustandes von ^{133}Cs . Die Zeitauflösung von LYSO ist wie erwartet besser, als die von NaI. Die NaI-Detektoren liefern aufgrund des sehr schwachen Ausgangssignals einer Anode sehr wenige Koinzidenzen.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden aus LYSO-Kristallen und Sekundärelektronenvervielfachern LYSO-Szintillationsdetektoren montiert. Diese sollen die NaI-Szintillationsdetektoren in einem Aufbau zum Messen von Lebensdauern angeregter Kernzustände ersetzen. Hierzu wurden zuerst die Energieauflösungen von NaI, LYSO und zum zusätzlichen Vergleich auch von CsF bestimmt. Danach wurde zuerst mit den NaI-Detektoren und danach mit den eingebauten LYSO-Detektoren die Lebensdauer des 81 keV-Zustandes von ^{133}Cs bestimmt.

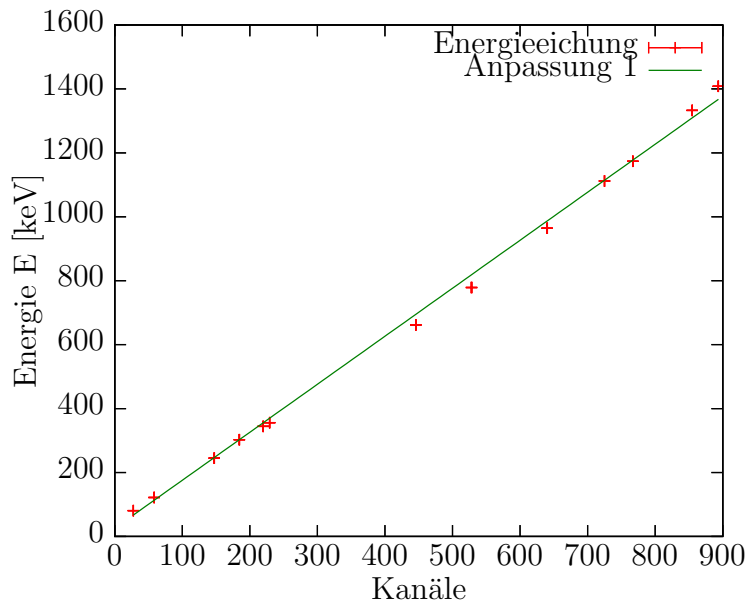
Die Energieauflösung von NaI wurde zu 7,03(4) % und die Zeitauflösung (FWHM bei 511 keV) zu 2,696(29) ns bestimmt. Die Messung der Lebensdauer des 81 keV-Zustandes von ^{133}Cs ergab 6,26(9) ns und stimmt im Rahmen der Fehler mit dem Literaturwert 6,283(14) ns [Kha11] überein. Aufgrund der geringen Ausgangssignale eines NaI-Detektors wurden jedoch sehr wenige Koinzidenzen gemessen. Hierdurch mussten die Messungen entsprechend lange laufen.

Die Energieauflösung von LYSO wurde zu 10,662(17) % und die Zeitauflösung (FWHM zwischen 80 keV und 356 keV) zu 1,308(10) ns bestimmt. Die Lebensdauerermessung des 81 keV-Zustandes von ^{133}Cs ergab 6,27(7) ns und stimmt im Rahmen der Fehler mit dem Literaturwert 6,283(14) ns [Kha11] überein.

Im Vergleich hat NaI die etwas bessere Energieauflösung, jedoch hat LYSO eine bessere Zeitauflösung und relative Nachweiswahrscheinlichkeit, besonders im Bereich höherer Energien. Die Auswertung der Energiespektren von LYSO ist zwar durch den LYSO-Untergrund arbeitsaufwändiger, bei den Zeitmessungen hat dies aber nicht gestört. LYSO ist also besser für die Lebensdauerermessung geeignet als NaI.

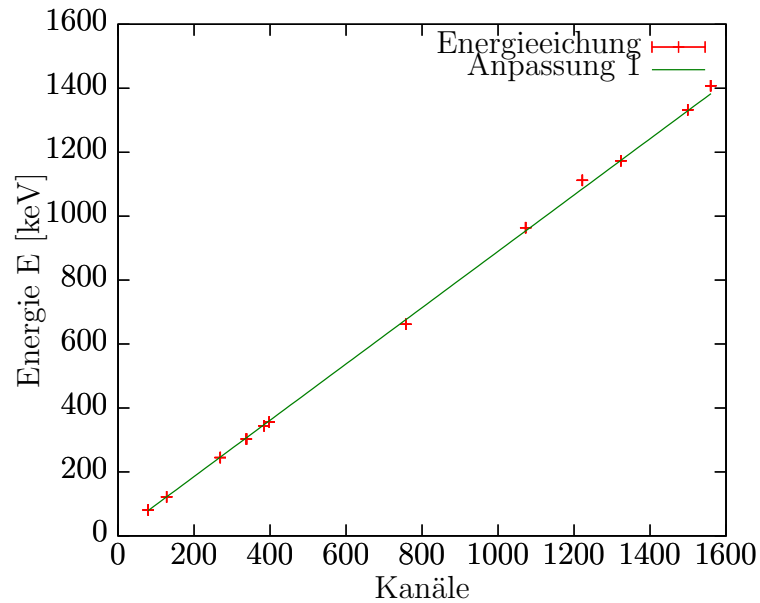
LYSO ist mit seiner guten Energie- und Zeitauflösung und seiner guten relativen Nachweiswahrscheinlichkeit ein interessanter Szintillationskristall, der seine Stärken besonders bei Auswertung von hochenergetischen Linien und Zeitmessungen mit komplizierteren Spektren als ^{133}Cs und kürzeren Lebensdauern als die des 81 keV-Zustandes von ^{133}Cs zeigt.

7 Anhang



Energie [keV]	Linien­schwerpunkt [Kanäle]
80,9979(11)	27,66(3)
121,7817(3)	58,35(4)
244,6975(8)	147,31(24)
302,8508(5)	184,46(24)
344,2785(12)	219,73(15)
356,0129(7)	229,23(10)
661,657(3)	445,69(3)
778,9040(18)	528,18(51)
964,079(18)	640,15(43)
1112,069(3)	725,05(2)
1173,228(3)	766,98(4)
1332,492(4)	854,80(4)
1408,006(3)	893,48(13)

Abbildung .1: Energieeichung LYSO

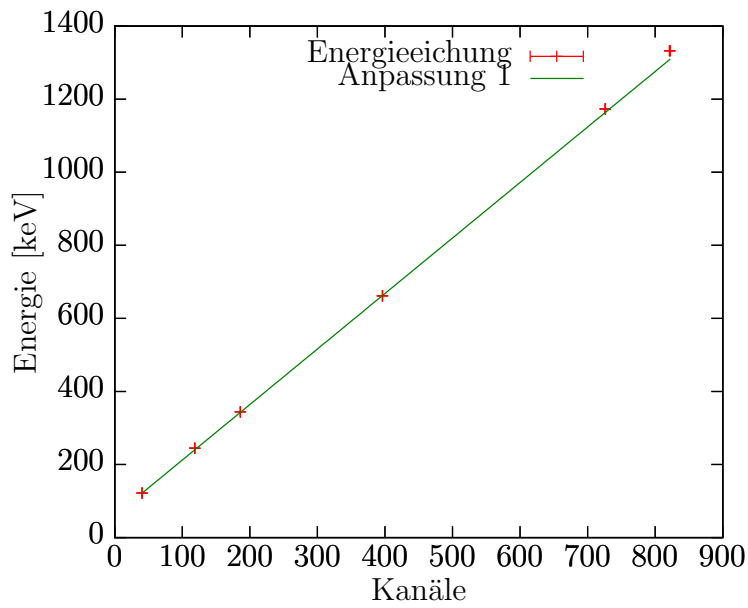


Energie [keV]	Linienschwerpunkt [Kanäle]
80,9979(11)	79,34(6)
121,7817(3)	127,74(4)
244,6975(8)	269,03(25)
302,8508(5)	338(1)
344,2785(12)	384,15(15)
356,0129(7)	397,83(19)
661,657(3)	757,13(13)
964,079(18)	1072,50(65)
1112,069(3)	1221,90(45)
1173,228(3)	1323,32(21)
1332,492(4)	1499,07(11)
1408,006(3)	1559,53(56)

Abbildung .2: Energieeichung NaI

σ [Kanäle]
89,3(6)
89,71(67)
89,29(54)
89,38(61)
88,14(62)

Tabelle .1: Standardabweichungen der fünf mit LYSO auf genommenen Promptkurven.
Der gewichtete Mittelwert beträgt 89,17(27) Kanäle



Energie [keV]	Linien­schwerpunkt [Kanäle]
121,7817(3)	40,541(23)
244,6975(8)	118,43(22)
344,2785(12)	185,96(9)
661,657(3)	396,36(5)
1173,228(3)	726,2(5)
1332,492(4)	821,7(8)

Abbildung .3: Energieeichung CsF

σ [Kanäle]
21.67(15)
22.20(15)
22.82(17)
21.13(13)
21.80(14)

Tabelle .2: Standardabweichungen der fünf mit LYSO auf genommenen Promptkurven.
Der gewichtete Mittelwert beträgt 21,81(7) Kanäle

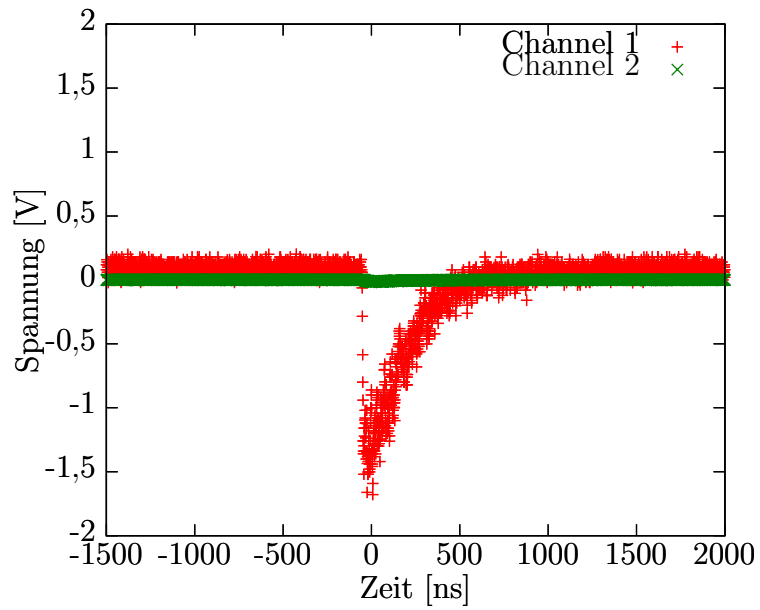


Abbildung .4: Vergleich der Ausgangssignale der Anoden der Natriumiodidszintillationsdetektoren. Das Signal von Channel 2 kann man kaum erkennen. Es es ist ungefähr -30 mV groß.

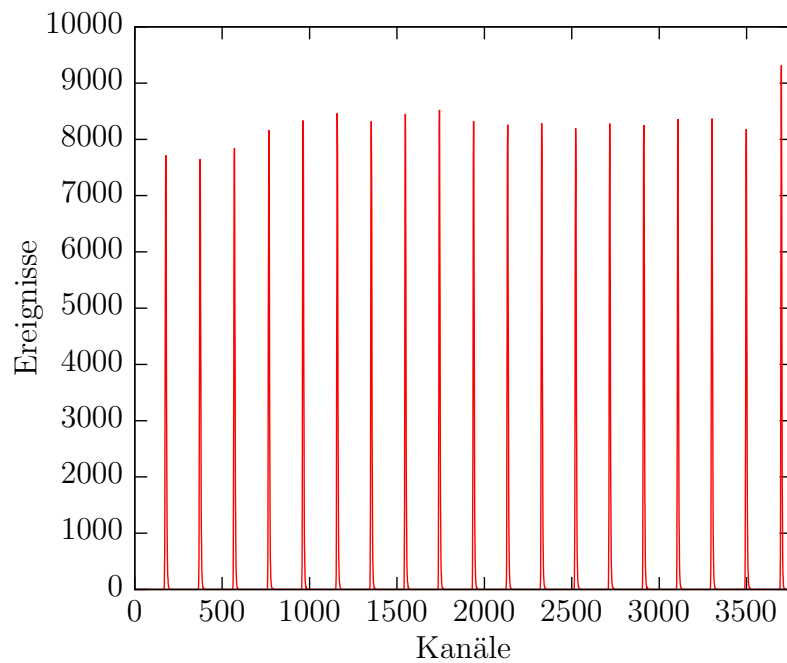


Abbildung .5: Linien des Flugzeiteichgenerators. Messzeit 400 s

Danksagung

Obwohl die Bachelorarbeit mit seinen vier Monaten nicht sonderlich lang ist im Vergleich zu Diplom- oder Masterarbeit, liefert sie einen guten Einblick in Wissenschaftliche Arbeit und selbstständiges Arbeiten. Sich selbst einzuteilen, wann man was macht, hat einem den sonst im Studium aufkommenden Abgabestress genommen, aber im Gegensatz natürlich eine höhere Disziplin und Selbstmotivation erfordert. Dennoch oder gerade deswegen war die Bachelorarbeit eine Erfahrung, die ich nicht missen will.

Mein erster Dank gilt natürlich Herrn PD Dr. Vianden, der schon bei der ersten Anfrage eine Gelassenheit ausgestrahlt hat, die einen sich richtig auf die Arbeit hat freuen lassen. Auch seine Ratschläge beim Einstellen und Verbessern meiner Schaltungen haben mich immer wieder vorrangebracht und motiviert.

Herrn Prof. Dr. Maier danke ich, dass er sich bereiterklärt hat als zweiter Gutachter zu fungieren.

Natürlich gilt mein Dank auch meiner restlichen Arbeitsgruppe, die mich sehr nett in ein sehr freundschaftliches und entspanntes Arbeitsverhältnis aufgenommen hat. Patrick danke, dass du mich über die Zeit betreut hast und Zeit für mich hattest, wenn etwas nicht ganz so geklappt hat, wie erwartet. Trotz deiner Bemühungen kann ich aber weiterhin weder Kaffee noch Espresso kochen. Ich danke auch Marius dafür, dass er mir oft Tips gegeben hat, wenn ich mir etwas nicht erklären konnte und natürlich für seine omnipotenten Latex-Kenntnisse. Dem Gaußmeister (manchmal auch Tim genannt) möchte ich dafür danken, dass er mir geholfen hat, den Gaußkurven das Fürchten zu lehren. Tim möchte ich dafür danken, dass er immer eine Tür weiter saß und sich meine Probleme und Geschichten angehört hat, wenn es nötig war. Henning möchte ich dafür danken, dass wir immer ein lustiges Thema zum Unterhalten hatten und ich durch ihn niemals das Gefühl hatte, zu spät zu sein. Stumpy (Alex), dir möchte ich danken, dass du mich mit deinen Textnachrichten auf andere Gedanken gebracht hast, wenn es mal frustrierend war. Gleichzeitig hast du mich dazu motiviert, früher aufzustehen, um so vor dir da zu sein. Dir, Timo, möchte ich danken, dass ich mit dir Stunden reden konnte, ohne dass es langweilig wurde. Ishita, es hat Spaß gemacht, neben dir zu sitzen und sich mit dir zu unterhalten. Und danke für die Kuchen, die du öfters gebacken hast. Danke Michi, dass ich auch dich immer ansprechen konnte, wenn ich eine Frage hatte und dass du mir besonders bei gnuplot immer gut geholfen hast.

Meiner Familie möchte ich dafür danken, dass sie immer für mich da war und ist. Wenn

es möglich gewesen wäre, wäre sie nach Bonn gekommen und hätten mit mir zusammen die Arbeit geschrieben.