

Fortgeschrittenes Physik Lab SS19

Experiment: Szintillationszähler

(Durchgeführt am: (07.-08).10.19 bei Patrick Scholer)

Erik Bode, Damian Lanzenstiel
(Group 103)

15. Oktober 2019

Zusammenfassung

???

Inhaltsverzeichnis

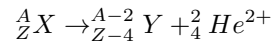
1	Theorie	2
1.1	Radioaktiver Zerfall	2
1.2	γ Strahlung	2
1.2.1	Wechselwirkungen von Materie mit γ Photonen	2
1.3	Nachweis von γ Photonen	3
1.3.1	Anorganischer Szintillator	3
1.3.2	Organischer Szintillator	3
1.3.3	Photomultiplier	4
2	Signalverarbeitung	4
2.0.1	Photomultiplier und Vorverstärker	4
2.1	NIM-Module	4
2.1.1	Hauptverstärker	4
2.1.2	Multichannel Analyzer (MCA)	5
2.1.3	Singlechannel Analyzer (SCA)	5
2.1.4	Koinzidenz Einheit	5
2.1.5	Timing Unit	5
2.1.6	Gate Generator	5
2.1.7	HEX-Counter	5
2.2	Oszilloskop	5
2.3	PC	5
3	Verwendete Isotope	5
3.1	Natrium	5
3.2	Cobalt	5
3.3	Europium	6
3.4	Thorium	6
4	Versuchsdurchführung	7
4.1	Signalformen	7
4.1.1	Einfluss der Parameter auf das Signal	7
4.2	Energiespektren	7
4.3	Koinzidenzmessung	8
5	Tabellen	13
6	Bilder	13
7	Bibliography	13
	Literatur	13
8	Anhang	13

1 Theorie

1.1 Radioaktiver Zerfall

Der beim radioaktiven Zerfall verwandelt sich ein instabiler Kern in einen leichteren unter Emission von Teilchen. Es existieren mehrere Arten von radioaktiven Zerfall:

- α
Bei dieser Zerfallsart stößt der Kern einen Heliumkern (ohne Elektronen) aus. Die Veränderung folgt diesem Schema:



- β^-
Bei dieser Zerfallsart zerfällt ein Neutron in ein Proton unter der Emission von einem Elektron und einem Antielektroneutrino.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

- β^+
Bei dieser Zerfallsart zerfällt ein Proton in ein Neutron unter Emission von einem Positron und einem Elektroneutrino.

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

- Electron Capture
Dieser Zerfall ist ähnlich zum β^+ Zerfall, da auch ein Neutron in ein Proton umgewandelt wird. Der Unterschied hier ist, dass ein Elektron eingefangen wird.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

1.2 γ Strahlung

Die zerfällt ein Kern über die oben genannten Zerfälle, hat der Tochterkern oft noch eine Restenergie, da es zufällig ist welche Energie nach dem Zerfall entstehen. Die angeregten Tochterkerne geben diese überschüssige Energie in Form von γ Photonen ab. Die Energien der γ Photonen liegen zwischen keV bis MeV.

1.2.1 Wechselwirkungen von Materie mit γ Photonen

Die Interaktion von γ Photonen ist abhängig von der Masse des interagierenden Kerns und der Energie des γ Photons.

- Photoelektrischer Effekt
Hierbei wird das γ Photon direkt von einem Elektron absorbiert. Die Energie des Photons wird komplett in kinetische Energie umgewandelt. Die so entstandene Lücke wird mit Elektronen aus höheren Schalen unter Abstrahlung von Röntgenstrahlung und Augerelektronen gefüllt. Dieser Effekt findet meist bei einer Energie $E_\gamma < 200 \text{ keV}$ und einer Atommasse von 50 statt.
- Compton Streuung
Im Unterschied zum Photoelektrischen Effekt werden die γ Photonen nicht absorbiert sondern streuen an den Elektronen. Hierbei geben sie einen Teil ihrer Energie ab. Compton Streuung findet meist bei einer Energie von $200 \text{ keV} < E_\gamma < 5 \text{ MeV}$ statt. Die Atommassen sind ähnlich zu denen des Photoeffekts.
- Paarbildung
Wenn die Energie E_γ eine kritische Energie von 1.022 MeV überschreitet, kann Paarbildung auftreten. Wenn ein γ Quant in das elektromagnetische Feld eines Elektrons oder Atomkerns kommt, kann es sich in ein Elektron-Positron Paar aufspalten.

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

Dies erklärt auch die kritische Energie von 1.022 MeV , was die doppelte Ruhemasse eines Elektrons ist. Energie des γ Photons über dieser Schwelle wird als kinetische Energie der entstandenen Teilchen weitergegeben. Das entstandene Positron ist sehr kurzlebig und zerstrahlt kurz nach entstehen mit einem Elektron in zwei γ Photonen mit einer Energie von jeweils 511 keV unter einem Winkel von 180° zu einander.

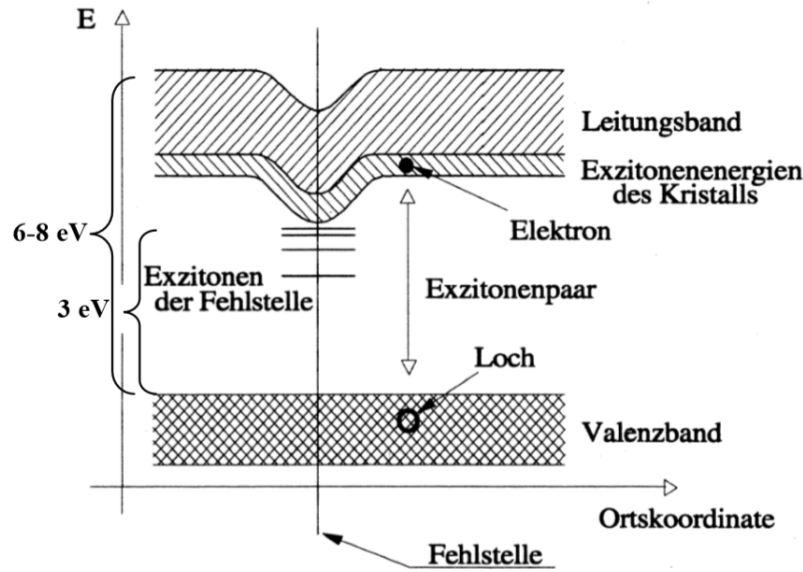


Abbildung 1: Bändermodell des Natriumiodid Szintillators, der mit Thallium dotiert ist. Entnommen aus [1]

1.3 Nachweis von γ Photonen

Die hochenergetischen Photonen werden mittels eines Szintillators nachgewiesen. Dies sind Materialien, welche die γ Photonen absorbieren und in Photonen kleinerer Energien aufspalten. Diese werden mittels eines Photomultipliers Detektiert. Im allgemeinen unterscheidet man zwischen zwei Verschiedenen Szintillator Typen.

1.3.1 Anorganischer Szintillator

Der in diesem Versuch verwendete anorganische Szintillator besitzt einen Natriumiodid Kristall, welcher mit Thallium dotiert ist. Die vom Kristall absorbierten γ Photonen besitzen die Energie, hunderte bis tausende Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband zu bewegen. An Stelle der Elektronen bleiben Löcher zurück. Nach einiger Zeit verlieren die angeregten Elektronen im Leitungsband ihre Energie unter Abstrahlung eines Photons. Ohne Dotierung würden die so emittierten Photonen wieder absorbiert werden und der Kristall wäre für diese undurchsichtig. Durch die Dotierung werden Aktivator Zentren erzeugt, an welchen der Übergang zwischen Valenz- und Leitungsband weniger Energie benötigt. Dies ist in Abbildung 1 zu sehen. An diesen Aktivator Zentren rekombinieren die Elektron-Loch Paare unter Abgabe von Photonen auf Aktivator Niveau. Diese Photonen werden von der Mehrheit des Kristalls nicht Absorbiert und können vom Photomultiplier detektiert werden.

Die hohen Atomaren Massen der Gitteratome des Kristalls ermöglichen eine gute Absorption der γ Photonen. Das führt zu einer hohen Lichtausbeute und geringen statistischen Schwankungen. Deshalb ist der Natriumiodid Szintillator gut für Energiemessungen geeignet. Die An- und Abregung des Kristalls findet aber auf einer Zeitskala von $100 \mu\text{s}$ statt, was die Zeitauflösung dieses Szintillators beschränkt.

1.3.2 Organischer Szintillator

Der im Versuch verwendete Plastiksintillator gehört zur Gruppe der Organischen Szintillatoren. Hier erzeugen die γ Photonen geladene Teilchen, welche wiederum die Moleküle des Plastiks anregen. Diese übertragen die Energie auf Moleküle der Aktivatorsubstanz. Analog zum Anorganischen Szintillator haben diese auch eine unterschiedliche Energiedifferenz zwischen Angeregtem- und Grundzustand als die Moleküle des Plastiks. Die Photonen der Aktivatorsubstanz können deshalb Detektiert werden.

Die Abklingzeit des Plastiks beträgt $8 \cdot 10^{-9} \text{ s}$, was in einer guten Zeitauflösung resultiert. Durch die niedrigeren Atommassen der Atome im Plastik ist eine Absorption der γ Photonen unwahrscheinlicher. Dies resultiert in einer schlechteren Energieauflösung.

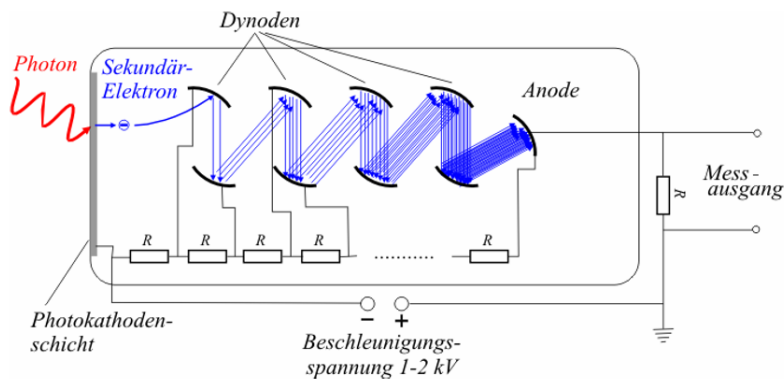


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers. Entnommen aus [1]

1.3.3 Photomultiplier

Der Aufbau eines Photomultipliers ist in Abbildung 2 zu sehen.

Die Photonen aus beiden Szintillatoren werden durch einen Photomultiplier detektiert. Eintreffende Photonen schlagen mittels des Photoeffektes Elektronen aus der Photokathode aus. Die Elektronen werden anschließend zu ersten Dynode mittels eines Elektrischen Feldes transportiert. Hier werden Sekundärelektronen ausgeschlagen. Diese werden anschließend vom Elektrischen Feld der nächsten Dynode angezogen, was zu einer kaskadierten Ladungsvervielfältigung führt.

2 Signalverarbeitung

2.0.1 Photomultiplier und Vorverstärker

Im Szintillatormaterial wird ein Einfallendes γ Photon in mehrere Photonen mit niedrigerer Energie umgewandelt. Diese entstehen kurz nach einander. Die Photonen werden im Photomultiplier detektiert und als Stromsignal ausgegeben.

Der Vorverstärker ist in diesem Versuch direkt in die Betriebseinheit des Photomultipliers eingebaut. Dies verkürzt die Signalleitungen und damit die Störanfälligkeit des Ladungssignals aus dem Photomultipliers. In diesem werden auch mehrere der Ladungsimpulse des Photomultipliers durch ein RC-Glied integriert und in leichter zu übertragende Spannungspulse umgewandelt. Diese werden anschließend durch den Hauptverstärker weiterverarbeitet.

2.1 NIM-Module

NIM (Nuclear Instrument Module) ist ein Standard für Messeinstrumente der Nuklearphysik. Es ist ein Modulares System, bei welchem die einzelnen Messgeräte eine standardisierte Größe besitzen und an der Rückseite Standardisierte Anschlüsse zur Energieversorgung besitzen. Alle in diesem Versuch verwendete Signalverarbeitungselektronik außer dem Vorverstärker, Oszilloskop und PC besitzt diesen Standard.

2.1.1 Hauptverstärker

Der Hauptverstärker Verstärkt die schwachen Signale des Vorverstärkers in Signale mit größerer Amplitude. Die Verstärkung ist grob und fein Einstellbar. Außerdem ist die Shaping-Time konfigurierbar, also die Zeit in welcher die Signale zur weiteren Verarbeitung geformt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Shaping-Time die Anstiegszeit des zu verstärkenden Signals nicht unterschreitet sodass die Energieinformationen des Signals nicht verloren gehen. Aber die Shaping-Time sollte so kurz wie möglich gewählt werden, sodass die Totzeit des Detektors minimiert ist.

Die Amplitude der Signale des Hauptverstärkers ist Proportional zur Energie der Detektierten Teilchen.

2.1.2 Multichannel Analyzer (MCA)

Der MCA Sortiert die eingehenden Signale anhand ihrer Amplitude in verschiedene Kanäle ein und speichert diese bzw. sendet sie an den PC. Die Amplitude der Signale variiert zwischen den Verschiedenen Versuchsaufbauten, sodass eine Kalibrierung an einem bekannten Isotop durchgeführt werden muss, um den aktuellen Zusammenhang zwischen Detektor Kanal und Energie zu bestimmen.

2.1.3 Singlechannel Analyzer (SCA)

Der SCA dient zur Signaldiskriminierung. Es ist ein Fenster Einstellbar, sodass alle Signale höherer oder niedrigerer Amplitude als eingestellt ignoriert werden.

2.1.4 Koinzidenz Einheit

Die Koinzidenzeinheit vergleicht zwei eingehende negative Rechtecksignale, ob diese Zeitgleich vorliegen. Ist dies der Fall wird ein negatives Rechtecksignal ausgegeben.

2.1.5 Timing Unit

Die Timing Unit modifiziert ein eingehendes negatives Rechtecksignal. Es ist möglich, die Dauer des Signals anzupassen und die Polarität umzukehren.

2.1.6 Gate Generator

Bei einem eingehenden Signal am Gate Generator leitet dieser für eine gewisse Zeit, Signale weiter. Sonst blockiert er die Signale.

2.1.7 HEX-Counter

Der HEX-Counter ist ein Zählgerät, welches für einen gewissen, einstellbaren Zeitraum die eingehenden negativen Impulse zählt.

2.2 Oszilloskop

Das Oszilloskop zeichnet Spannungssignale gegenüber der Zeit auf. Es kann diese Signale auch dauerhaft speichern. Es ist darauf zu achten, die Impedanz des Oszilloskops an die der NIM-Module anzupassen, da die Eingangsimpedanz des Oszilloskops $1\text{ M}\Omega$ beträgt. Dies kann durch eine Reihenschaltung von Oszilloskop und $50\text{ }\Omega$ Widerstand erreicht werden.

2.3 PC

Der PC kann die Daten des MCA auslesen und zur Weiterverarbeitung abspeichern. Hierzu stehen mehrere Dateiformate zur Verfügung. Bei einer Auswertung in Python ist das *.TKA Format empfohlen.

3 Verwendete Isotope

Während des Versuches wurden die Nachfolgenden Isotope verwendet. Es werden nur die erwarteten deutlich Messbaren Zerfälle gelistet.

3.1 Natrium

Das (^{22}Na) Isotop von Natrium zerfällt am häufigsten mittels β^+ Zerfall in den Angeregten Zustand von ^{22}Ne . Die überschüssige Energie des Neon Kerns wird in Form eines γ Photons der Energie 1275 keV Abgegeben. Da diese Photon über der kritischen Energie liegt, sollte auch ein Vernichtungsspeak bei 511 keV messbar sein. Das genaue Zerfallsschema ist in Abbildung 3 zu erkennen.

3.2 Cobalt

Das hier verwendete ^{60}Co Isotop zerfällt über einen β^- Zerfall in ^{60}Ni im angeregten Zustand. Dieser gibt seine Energie in der Regel in zwei schritten über γ Photonen der Energien 1333 und 1173 keV ab. Das genaue Zerfallsschema ist in Abbildung 4 zu erkennen.

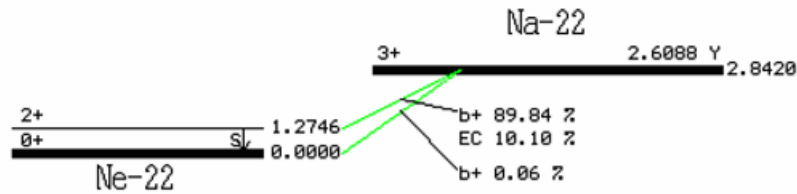


Abbildung 3: Das Zerfallsschema des verwendeten ^{22}Na Isotops mit allen möglichen Übergängen. Die Energien sind in MeV angegeben. Entnommen aus [1]

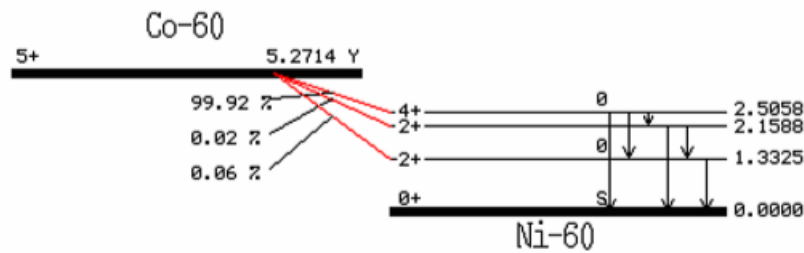


Abbildung 4: Das Zerfallsschema des verwendeten ^{60}Co Isotops mit allen möglichen Übergängen. Die Energien sind in MeV angegeben. Entnommen aus [1]

3.3 Europium

Das Zerfallsschema von ^{152}Eu ist viel komplexer als die von Cobalt und Natrium, weshalb nur die beiden intensivsten Übergänge erwähnt werden, welche auch zur Energie Eichung verwendet wurden. Hierbei handelt es sich um die Zerfälle mit Tochterkernen ^{152}Sm und ^{152}Gd bei welchen jeweils γ Photonen der Energien 122 keV und 344 keV emittiert werden. Diese Vereinfachung ist in Abbildung 5 sichtbar.

3.4 Thorium

Das hier verwendete ^{228}Th Isotop zerfällt über α und β Zerfall unter der Emission von γ Photonen mit vielen Verschiedenen Energien zu ^{208}Pb . Die genaue Zerfallsreihe ist zu komplex um hier genauer darauf einzugehen. Es werden in der Auswertung die Beobachteten γ Photonen den respektive Übergängen zuzuordnen. Eine detaillierte Zerfallsreihe ist in der Staatsexamensarbeit von T.Kotyk [1] zu finden.

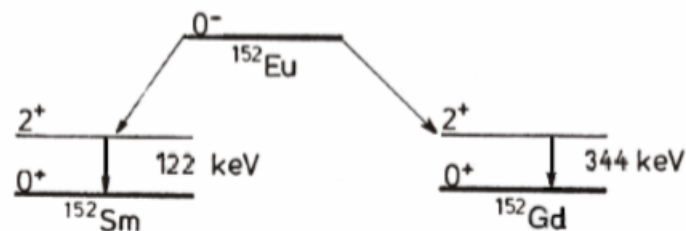


Abbildung 5: Das Zerfallsschema des verwendeten ^{152}Eu Isotops mit beiden wahrscheinlichsten Übergängen. Entnommen aus [1]

4 Versuchsdurchführung

Nach einem Missverständnis zur Bestimmung der Shaping-Time wurde mit den eigentlichen Messungen und Einstellungen begonnen.

4.1 Signalformen

Zunächst wurden die Signale aus beiden Vorverstärkern mit dem Oszilloskop aufgezeichnet. Diese sind in den Abbildungen 6 und 7 zu sehen.

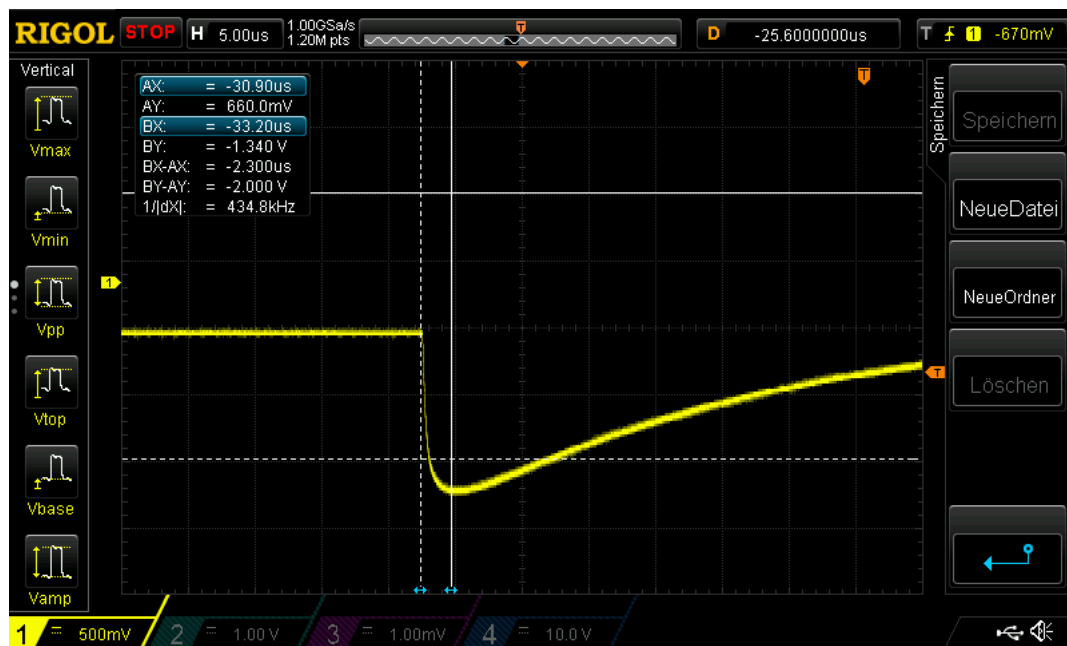


Abbildung 6: Im Bild ist das Signal des Vorverstärkers des Anorganischen Szintillators zu sehen. Zusätzlich ist die benötigte Zeit von Beginn des Signals bis Erreichen der maximalen Amplitude aufgetragen.

Aus den Abbildungen wird ersichtlich, dass man für den Anorganischen Szintillator eine Shaping-Time von mindestens $2\mu\text{s}$ und für den Organischen eine von min. 8 ns nötig wäre. Für den Anorganischen Szintillator konnten $2\mu\text{s}$ gewählt werden, für den Organischen mussten leider 500 ns eingestellt werden, da dies die kleinste Einstellung war.

Anschließend wurden die Signale des Hauptverstärker angeschlossen an den anorganischen Szintillator mit dem Oszilloskop untersucht, zur Analyse der Signalform des Ausgangssignals und um sicherzustellen, dass keine Sättigung des Signals auftritt. Alle Ausgänge funktionierten und gaben die erwarteten Signale aus. Diese sind in den Abbildungen 8 und 9 sichtbar.

4.1.1 Einfluss der Parameter auf das Signal

Während dem Einstellen der Geräte wurden die Signale durchgehend auf dem Oszilloskop oder am PC beobachtet. Hier fiel auf, dass wenn die Shaping-Time zu niedrig eingestellt war, das Signal des Hauptverstärkers eine viel geringere Amplitude als bei höheren Einstellungen ausgab. Wurde die Shaping-Time zu groß gewählt, wurde kaum eine Veränderung bemerkt. Bei Verstellen der Verstärkung fiel auf, dass nach überschreiten einer Ausgangsspannung von $\approx 10\text{ V}$ sich eine Sättigung zeigte: Das erwartete Signal wurde über dieser Spannung abgeschnitten und auf sie zurückgesetzt.

Die Upper- und Lower Level des SCA hatten keinen Einfluss auf die Signalform, es musste deshalb mittels des Gate Generators und MCA das Signal am PC ausgewertet werden um eine korrekte Einstellung zu gewährleisten.

4.2 Energiespektren

Nach Einstellen der Verstärker wurde nun das unipolare Signal des anorganischen Szintillators mit dem MCA verbunden. Dies ist sichtbar in der Abbildung 10. Dies wurde gewählt, da hier die gemessene Amplitude des Signals stärker von Energieänderungen abhängig ist als beim bipolaren Signal. Nun wurde

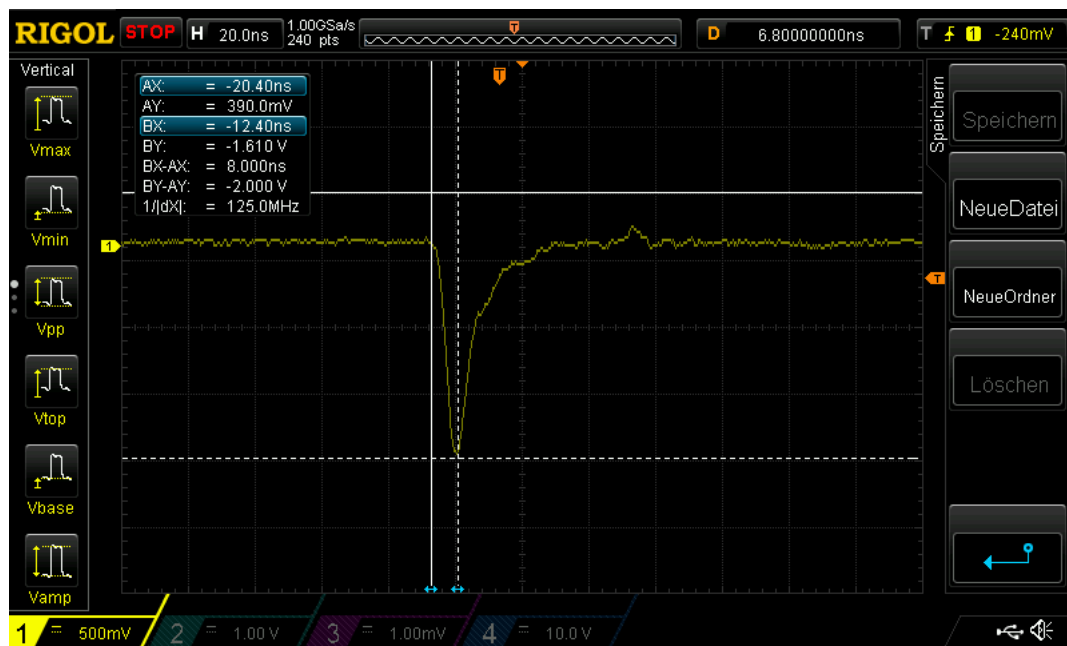


Abbildung 7: Im Bild ist das Signal des Vorverstärkers des Organischen Szintillators zu sehen. Zusätzlich ist die benötigte Zeit von Beginn des Signals bis Erreichen der maximalen Amplitude aufgetragen.

eine Testmessung an Natrium (^{22}Na) durchgeführt, um die benötigte Kanalanzahl zu bestimmen. Letztendlich wurde entschieden, dass 8192 Kanäle ausreichend wären und die vollen 16384 Kanäle des MCA eine zu genaue Aufteilung der eingehenden Signale und damit zu lange Messzeiten verursachen würden.

Anschließend wurde nichts mehr an diesem Teil des Aufbaus verändert. Nun wurden die Kalibriermessungen mit Natrium (^{22}Na), Cobalt (^{60}Co) und Europium (^{152}Eu) gestartet. Diese geben leicht erkennbare Referenzpeaks, welche für eine Energieeichung des MCA genutzt werden. Am Ende der Referenzmessungen wurde festgestellt, dass die Natrium Probe während der Cobalt Messung zu nahe am Detektor stand und diese beeinträchtigte. Deshalb wurde sie wiederholt. Anschließend daran wurden die Untergrundmessungen durchgeführt, zwei weil die erste über eine zu kurze Zeitspanne durchgeführt wurde.

Nachdem diese Vorbereitungen abgeschlossen waren, wurde die Übernachtsmessung von Thorium (^{228}Th) durchgeführt.

4.3 Koinzidenzmessung

Zur Koinzidenzmessung wurden als Vorbereitung nach erster Untergrundmessung der Energiespektren die Ausgänge des Hauptverstärkers betrachtet. Hierbei wurde die Natrium Probe als Signalquelle gewählt, da diese auch bei der Koinzidenzmessung verwendet wird. Die uni- und bipolaren Signale unterscheiden sich hier aber kaum, was aus den Abbildungen 11 und 12 hervorgeht. Dies ist dennoch bei der eigentlichen Messung vernachlässigbar.

Am nächsten Tag wurde die Koinzidenzschaltung nach Abbildung 13 aufgebaut. Es wird die Natrium Probe für alle weiteren Messungen verwendet. Die Energiefenster des SCA wurden mittels des MCA und des PC auf den 511 keV Vernichtungspeak des Natriumspektrums eingestellt. Anschließend wurden die Signale des SCA mit dem Oszilloskops aufgezeichnet. Diese sind in den Abbildungen 14 und 15 zu finden. Anschließend wurde das Ausgangssignal der Timing-Unit eingestellt und aufgezeichnet. Es sieht analog zum positiven Signal des SCA aus, nur ist das Plato negativ im Vergleich zur Nulllinie. Anschließend wurde die Verzögerung der Signale zueinander soweit angepasst, dass die Mehrheit der Signale überlappte.

Nun wurde mit der Koinzidenzmessung begonnen. Der organische Szintillator wurde in die 0° Stellung gebracht um die Messzeit festzulegen. Es wurden 100s gewählt, was zu einem relativen Fehler von $\approx 3\%$ ergab. Anschließend wurde von 0° beginnend Messungen bei unterschiedlichen Winkeln in immer größer werdenden Schritten durchgeführt. Als das erste mal 90° erreicht wurde, ist eine Hintergrundmessung mit Messzeit 10^5 s durchgeführt worden. Anschließend wurde erneut von 0° gestartet und in die andere Richtung gemessen. Hier wurde bei 90° keine Untergrundmessung durchgeführt.



Abbildung 8: Im Bild ist das bipolare Signal des Hauptverstärker des anorganischen Szintillators zu sehen. Zusätzlich sind die korrespondierenden Signale des Vorverstärkers sichtbar.

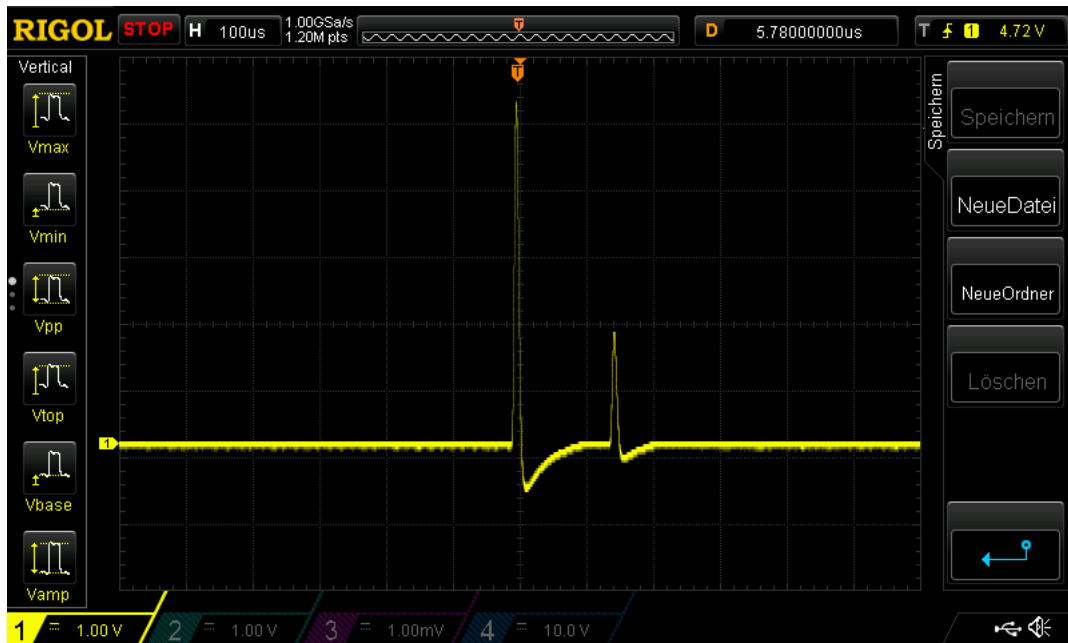


Abbildung 9: Im Bild ist das unipolare Signal des Hauptverstärker des anorganischen Szintillators zu sehen.

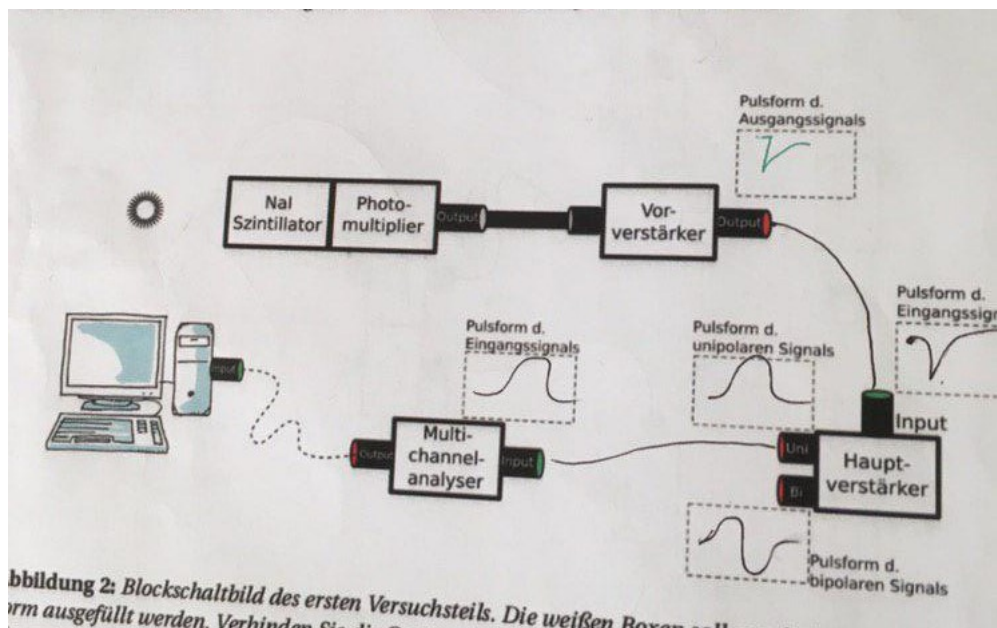


Abbildung 10: Der schematische Aufbau für die Messung der Energiespektren sowie die Signalformen der ein- und ausgehenden Signale sind hier eingezeichnet.

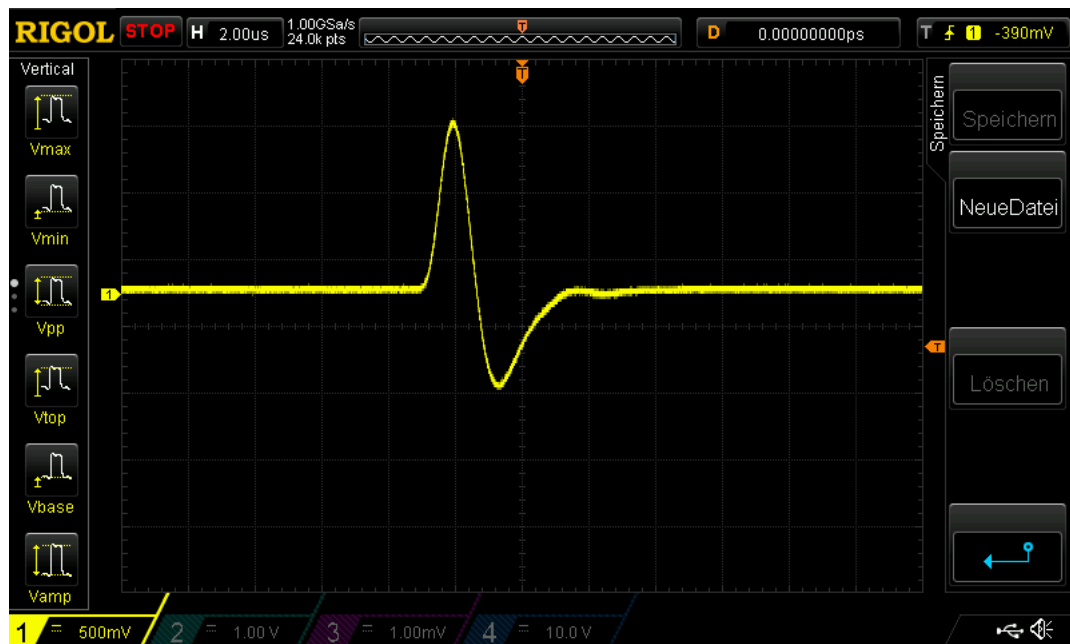


Abbildung 11: Im Bild ist das unipolare Signal des Hauptverstärker des organischen Szintillators zu sehen. Es ist Auffällig, dass sich unipolares und bipolares Signal dieses Verstärkers sehr ähneln.



Abbildung 12: Im Bild ist das unipolare Signal des Hauptverstärker des organischen Szintillators zu sehen.

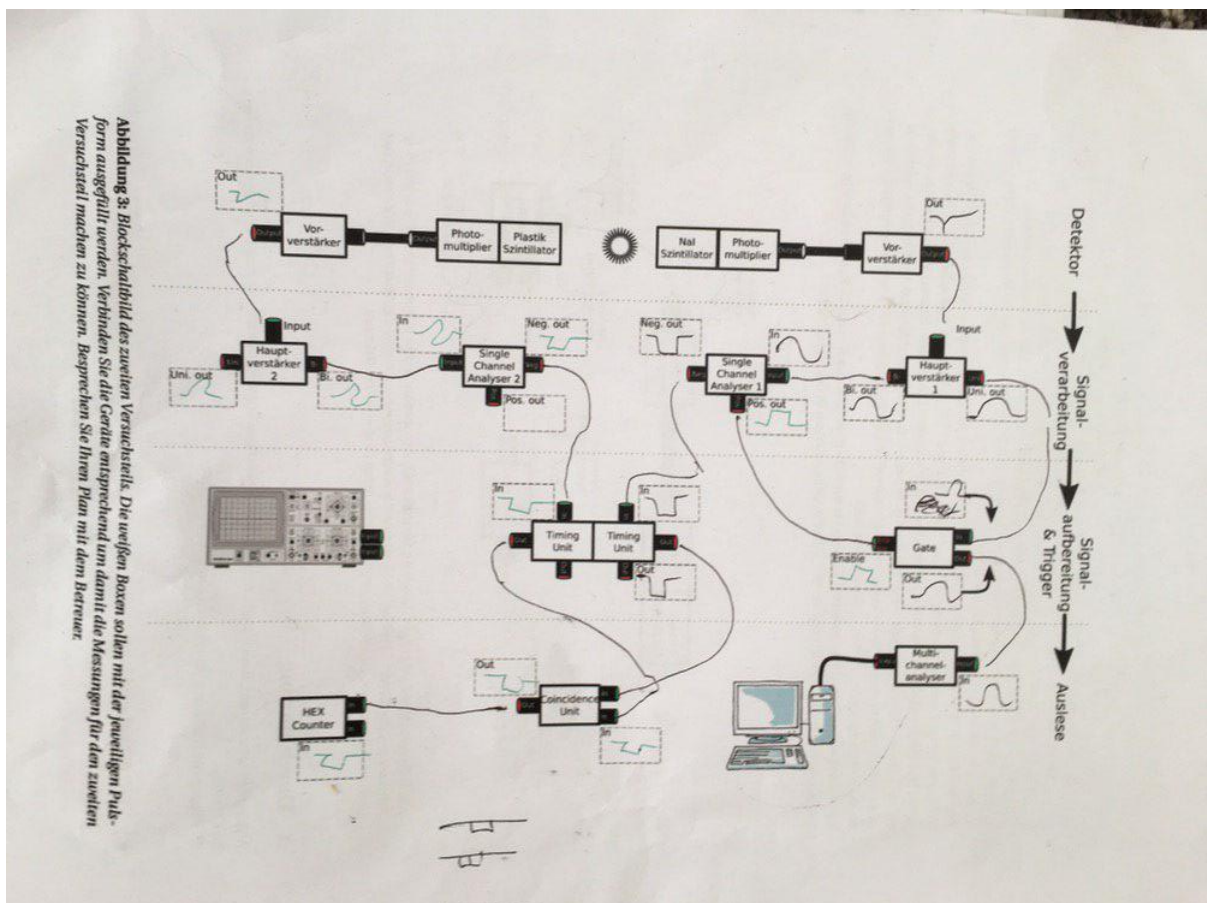


Abbildung 13: Der schematische Aufbau für die Koinzidenzmessung sowie die Signalformen der ein- und ausgehenden Signale sind hier eingezeichnet.

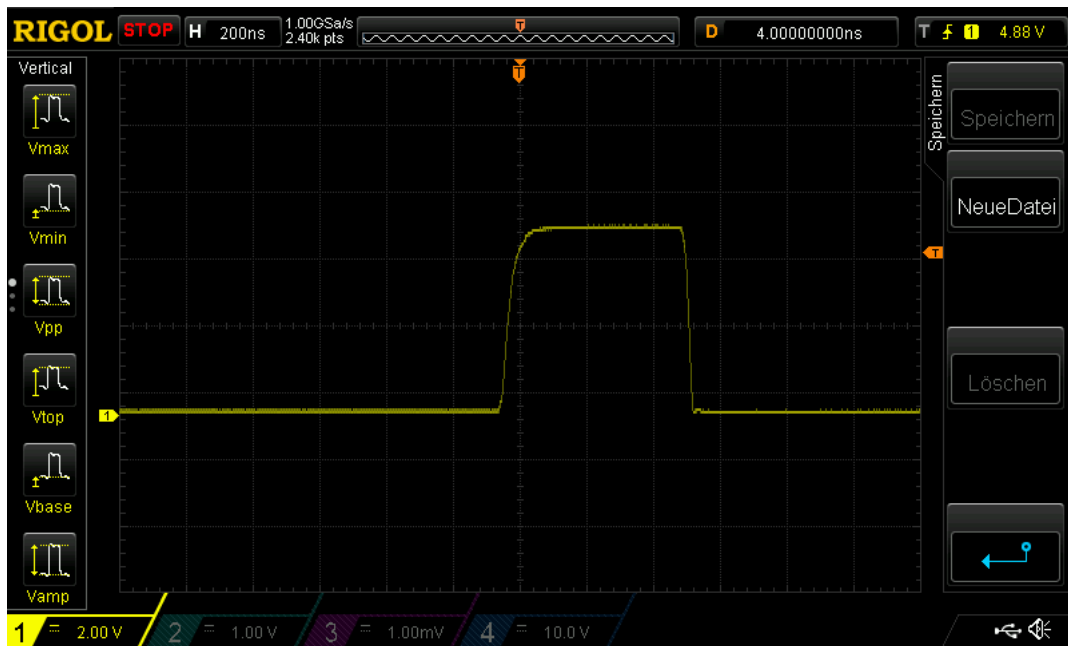


Abbildung 14: Im Bild ist das positive Signal des SCA sichtbar. Die Signalforn ist vergleichbar mit den sonstigen Rechtecksignalen.

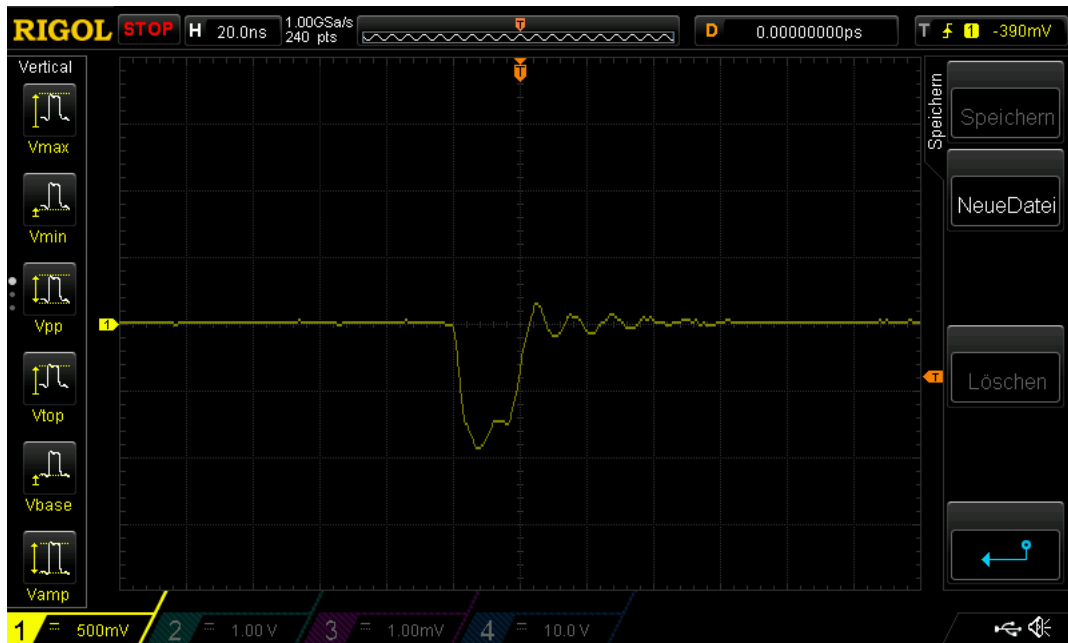


Abbildung 15: Im Bild ist das negative Signal des SCA sichtbar.

5 Tabellen

Tabellenverzeichnis

6 Bilder

Abbildungsverzeichnis

1	Bändermodell in dotiertem NaJ	3
2	Aufbau Photomultiplier	4
3	Zerfallsschema Natrium	6
4	Zerfallsschema Cobalt	6
5	Zerfallsschema Europium	6
6	Signal des NaJ Preamp.	7
7	Signal des Organischen Preamp.	8
8	Bipolares Signal des Anorganischen Amp.	9
9	Unipolares Signal des Anorganischen Amp.	9
10	Schematischer Aufbau zur Energiemessung	10
11	Unipolares Signal des Organischen Amp.	10
12	Bipolares Signal des Organischen Amp.	11
13	Schematischer Aufbau zur Koinzidenzmessung	11
14	Positives Signal des SCA	12
15	Negatives Signal des SCA	12

7 Bibliograpy

Literatur

- [1] Tobias Kotyk. Versuche zur radioaktivität im physikalischen fortgeschrittenen praktikum an der albert-ludwigs-universität freiburg, 2005.

8 Anhang