

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Physikalisches Institut
Abteilung Prof. Karl Jakobs
Fortgeschrittenen-Praktikum (für Lehrämter)

Szintillationszähler

von Christian Asal und Maximilian Oskar Metz
Durchgeführt am und 20/21.09.2016

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	1
2.1 Zerfallsprozesse	1
2.2 beta-Zerfall	1
2.3 γ -Zerfall	2
2.4 Elektronen in der Atomhülle	2
2.5 Wechselwirkung von γ -Quanten mit Materie	2
2.5.1 Photoeffekt	2
2.5.2 Comptoneffekt	2
2.6 Paarvernichtung	3
2.7 Characteristische Strukturen im Spektrum	3
2.8 Verwendete radioaktive Präparate	4
2.8.1 Natrium 22	4
2.8.2 Cobald 60	4
2.8.3 Europium 152	5
2.8.4 Thorium 228	5
2.9 Verwendete Geräte	7
2.9.1 anorganischer Szintillator	7
2.9.2 organischer Szintillator	7
2.9.3 Photomultiplier	7
2.9.4 NIM-Schaltungselektronik	7
3 Versuchsaufbau und Durchführung	9
3.1 Aufnahme der Spektren	9
3.2 Koinzidenzmessung	9
4 Auswertung und Diskussion	11
4.1 Versuchsteil 1: Energiekalibrierung und Analyse der Spektren	11
4.1.1 Oszilloskopaufnahmen	11
4.1.2 Energiekalibrierung	13
4.1.3 Spektrum ^{22}Na	19
4.1.4 Spektrum ^{60}Co	19
4.1.5 Spektrum ^{153}Eu	19
4.1.6 Hauptmessung Spektrum ^{228}Th	19
4.1.7 Untergrundmessung	19
4.2 Versuchsteil 2: Koinzidenzmessung	19
4.2.1 Aufbau der Schaltung	20
4.2.2 Koinzidenzmessung	22

5 Zusammenfassung	25
5.1 Erster Teil: Analyse des Spektrums von ^{228}Th	25
5.2 Zweiter Teil: Winkelabhängigkeit der Paarvernichtung	25
A Screenshots der Spektren während der Durchführung	26
B Originalprotokoll	28

1 Einleitung

Im vorliegenden Versuch werden die Spektren der Radioaktiven Isotope ^{22}Na , ^{60}Co , ^{152}Eu und ^{228}Th aufgenommen und die Winkelabhängigkeit der Paarvernichtung des ^{22}Na mittels einer Koinzidenzmessung untersucht. Der Fokus liegt dabei auf der Förderung des Verständnisses von Analogelektronik, Szintillatoren und NIM-Schaltungsstandards(Nuclear Instrumentation Standard).

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Zerfallsprozesse

(Aus [4], S.11 f.)

Als radioaktiven Zerfall bezeichnet man die Veränderungen in Atomkernen, bei der ein Kern ${}^A_Z X$ in einen Tochterkern übergeht, der eine andere Massenzahl A, Kernladungszahl Z oder einen anderen Anregungszustand hat. Die Änderung hängt dabei von der Art des Zerfalles ab. Radioaktive Zerfälle sind statistische Prozesse, in dem jeder einzelne Kern eine unabhängige Zerfallszeit hat. Grundsätzlich werden 3 Arten des radioaktiven Zerfalles unterschieden: der α -, β - und γ -Zerfall.

2.2 beta-Zerfall

(Aus [4], S.14 f.)

Als beta-Zerfall bezeichnet man den Übergang eines Mutterkernes ${}^A_Z X$ in einen Tochterkern ${}^A_{Z\pm 1} X$, der eine um den Betrag eins veränderte Kernladungszahl aufweist. Für diesen Fall gibt es drei unterschiedliche Ereignisse: den β^+ -Zerfall, den β^- -Zerfall und den Elektronen-Einfang.

- (i) Ein β^- -Zerfall beschreibt die Umwandlung eines Neutrons n des Kerns in ein Proton p unter Emission eines Elektrons e^- und eines Anti-Elektronneutrino $\bar{\nu}_e$:

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

- (ii) Ein β^+ -Zerfall beschreibt die Umwandlung eines Protons im Kern in ein Neutron unter Emission eines Positrons e^+ und eines Elektronneutrinos ν_e :

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

- (iii) Beim Elektronen-Einfang wird ein Bahnelektron (meist eines aus der kernnächsten Schale) vom Kern unter Emission eines Elektronneutrinos eingefangen, wobei die entstandene Lücke von einem anderen Elektron aus einer höheren Schale aufgefüllt wird.

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

Der Elektroneneinfang führt somit im Kern zu gleichen Änderungen wie der β^+ -Zerfall.

2.3 γ -Zerfall

(Aus [4], S.16 ff.)

Der γ -Zerfall ist eine Begleiterscheinung der anderen Kernzerfälle. Bei diesen ist der entstandene Tochterkern meist zunächst in einem angeregten Zustand, bevor er unter γ -Emission in niedrigere Energiezustände fallen kann.

Allerdings kommt es nicht immer zu einem γ -Zerfall, besonders bei schweren Kernen und geringen Zerfallsenergien kommt es zur **inneren Konversion**. Dabei wird die Energie des angeregten Zustandes eines Kernes, ohne Aussendung eines γ -Quants, direkt an ein Hückelelektron abgegeben und dieses ausgesendet, wobei es kein kontinuierliches Spektrum wie beim beta-Zerfall erzeugt, sondern ein von seiner Schale abhängiges monoenergetisches Spektrum.

2.4 Elektronen in der Atomhülle

(Aus [4], S.17 f.)

Nach einem Elektroneneinfang oder einer Inneren Konversion existiert in der Hülle des Atoms ein unbesetzter Elektronenzustand. Eine solche Lücke wird von einem Elektron aus einer höheren Schale gefüllt, wobei die dabei frei werdende Energie (die aus der Differenz der Bindungsenergien resultiert) durch Emission eines Röntgenquants abgeführt wird oder an ein anderes Elektron einer anderen Schale übertragen wird. Dieses Auger-Elektron wird dann aus der Hülle befreit und hinterlässt wiederum eine Lücke. Diese Lücke kann wiederum von Elektronen aus höheren Schalen gefüllt werden. So kann wiederholt charakteristische Röntgenstrahlung oder ein Auger-Elektron entstehen.

2.5 Wechselwirkung von γ -Quanten mit Materie

(Aus [4], S.25 ff.)

Zum Nachweis von Gamma-Quanten müssen diese mit Materie wechselwirken. Es gibt drei verschiedene Arten der Wechselwirkung. Die Wirkungsquerschnitte dieser Arten hängen von der Kernladungszahl Z des Materials sowie der Energie E_γ der γ -Quanten ab.

2.5.1 Photoeffekt

Beim Photoeffekt überträgt ein γ -Quant seine gesammte Energie auf ein Elektron, welches dadurch aus der Atomhülle entkommen kann. Die dabei entstehende Lücke wird wieder gefüllt, wobei ein Röntgenquant oder ein Auger-Elektron die dabei freiwerdenende Energie erhält.

2.5.2 Comptoneffekt

Beim Comptoneffekt überträgt ein γ -Quant beim Auftreffen auf ein Elektron nur einen Teil seiner Energie und wird am Elektron gestreut, so dass es mit seiner verbliebenen

Energie abgelenkt wird. Die maximal Mögliche Energie kann bei Rückstreuung (also einem Streuwinkel von 180°) übertragen werden.

2.6 Paarvernichtung

Entsteht (z.B. aufgrund eines β^+ -Zerfalls) ein Positron, wird dieses nicht lange existieren sondern es kommt zu einer Paarvernichtung mit einem Elektron. Dabei werden 2 γ -Quanten mit dem Energieäquivalent der Ruhemasse der beiden Teilchen erzeugt. Da das Positron bei seiner Erzeugung keine kinetische Energie besitzt und sehr schnell (fast instantan) auf ein Elektron trifft ist die Energie sehr genau der Ruhemasse und nicht mehr. Die γ -Quanten besitzen somit beide eine Energie von $E=511$ KeV. Weiterhin haben die γ -Quanten aufgrund der Impulserhaltung einen sehr kleinen Gesammtimpuls und sind daher in ihre Bewegungsrichtung sehr stark antikorreliert. Das heist der Winkel zwischen den beiden Quanten ist immer sehr nahe bei 180° .

2.7 Characteristische Strukturen im Spektrum

(Aus [3], S.6 ff.)

Photopeak Der Photopeak ist das monoenergetisches Hauptmaximum ausgesendeter γ -Quanten einer bestimmten Energie. Wobei das γ -Quant seine gesammte Energie an den Szintillator abgibt, insbesondere auch die Energie, welche durch das Auffüllen innerer Schalen z.B. durch ein Auger-Elektron frei wird. Der Photopeak ist somit bei E_γ zu finden.

Escapepeak Ein Auger Elektron wird normalerweise vom Szintillator absorbiert, ein Röntgenquant dagegen kann den Kristall des Szintillators ohne Wechselwirkung verlassen, so dass dessen Energie verloren geht. Geschieht dies, findet der Energieeintrag nicht im Photopeak sondern im sogenannten Escapepeak, der um die Differenz der Bindungsenergie der K- und L-Schale(28 keV bei Iod, in dem hier der Photoeffekt stattfindet) kleiner ist. Der Escapepeak ist somit bei $E_\gamma - 28$ keV zu finden.

Compton-Kante Im niederen Energiebereich des Spektrums finden sich breit gestreute Ereignisse, die man Compton-Kontinuum nennt. Dieses resultiert aus dem Compton Effekt und die Streuung erklärt sich dadurch, dass die γ -Quanten in einem beliebigen Winkel zwischen 0° und 180° an einem Elektron im NaI-Kristall des Szintillators und dabei unterschiedliche Energien bis zu einem Maximum bei 180° an den Szintillator abgeben. Das Ende des Kontinuums bei der Energie des maximalen Streuwinkels wird Compton-Kante genannt. Diese an sich scharfe Kante ist in gemessenen Spektren durch Auflösungseffekte sowie Rauschen des Detektors und der Elektronik verschmiert.

Rückstreupeak Ein Rückstreupeak kommt durch in der Umgebung des Szintillators gestreute γ -Quanten zustande, die nach der Streuung in den Szintillator gelangen und dort ihre verbliebene Energie abgeben. Mit der Wahrscheinlichsten Energieabgabe in der Abschirmung E_a ist der Rückstreupeak bei $E_\gamma - E_a$ zu finden.

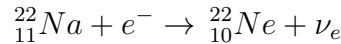
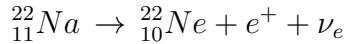
Röntgen-Fluoreszenzpeak Im gemessenen Spektrum kann ein weiterer Peak bei der Energie characteristischer Röntgenstrahlung auftreten. Dieser entsteht durch γ -Quanten, welche mit der Umgebung wechselwirken, aber nicht im Szintillator nachgewiesen werden.

2.8 Verwendete radioaktive Präparate

(Aus [4], S.81 ff.)

2.8.1 Natrium 22

^{22}Na zerfällt zu fast 100 % in den angeregten Kernzustand 2^+ von ^{22}Ne . Bei diesem Übergang handelt es sich zu 89,9% um einen β^+ -Zerfall und zu 10,1 % um Elektroneneinfang:



Das bei β^+ -Zerfall entstehende Positron sorgt für einen Intensiven Vernichtungsspeak bei 511 keV. Unter Aussendung eines γ -Quants mit der Energie von 1274,6 keV zerfällt der angeregte Zustand des ^{22}Ne in den Grundzustand.

2.8.2 Cobald 60

^{60}Co zerfällt durch β^- -Zerfall zu annähernd 100 % in den dritten angeregten Kernzustand 4^+ von ^{60}Ni :

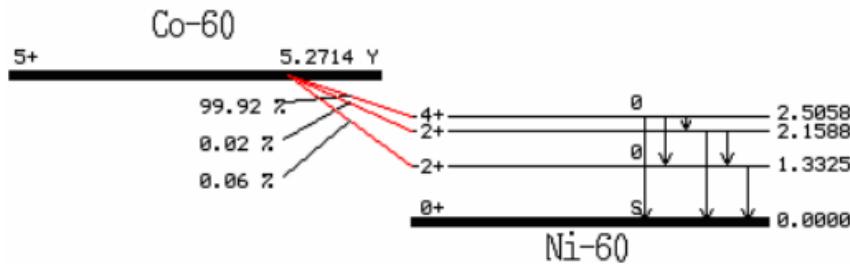
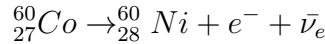


Abbildung 1: Zerfallsschema von Cobald 60, vereinfacht, aus [4], S.82

Im Spektrum werden zwei Linien sichtbar, die zur Energieeichung verwendet werden. Diese sind der wahrscheinlichste Übergang vom angeregten Zustand 4^+ in den Kernzustand 2^+ unter Emission eines γ -Quants der Energie 1173,2 keV und darauf folgend der Übergang in den Grundzustand unter Emission eines γ -Quants der Energie 1332,5 keV.

2.8.3 Europium 152

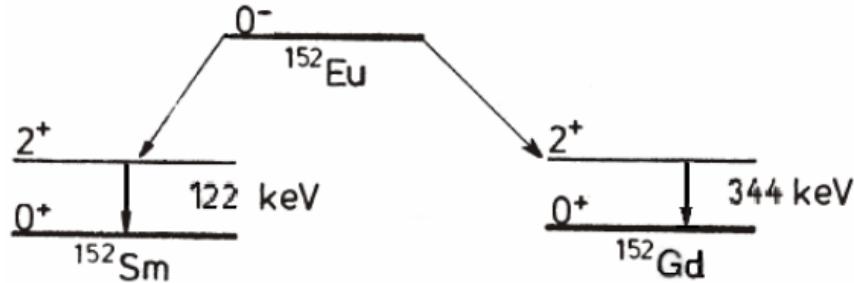


Abbildung 2: Zerfallsschema von Europium 152, stark vereinfacht, aus [4], S.83

Das Zerfallsschema von ^{152}Eu ist sehr komplex, in Abbildung 2 werden lediglich zwei im Spektrum gut sichtbare Linien gezeigt, die für die Energieeichung verwendet werden. Diese senden γ -Quanten der Energien 122 keV und 344 keV aus.

2.8.4 Thorium 228

Das zu analysierende ^{228}Th hat eine längere Zerfallsreihe, bevor es zu stabilem ^{208}Pb wird. In Abbildung 3 ist die Zerfallsreihe von ^{232}Th über ^{228}Th dargestellt.

Thorium – Reihe										
							Ra-228 5,7 a	←	Th-232 $1,4 \cdot 10^{10} \text{ a}$	
	Pb-212 10,6 h	←	Po-216 0,15 s	←	Rn-220 55,6 s	←	Ac-228 6,13 h	←		
TI-208 3,1 m	← 36,2 %	Pb-212 60,6 m			Ra-224 3,64 d	←	Th-228 1,9 a	←		
	Pb-208 stabil	←	Po-212 0,3 μs							

Abbildung 3: Zerfallsreihe von ^{232}Th mit ^{228}Th , aus [4], S.83

Im Spektrum können die intensivsten Übergänge mit ihrer jeweiligen Intensität wie folgt auftreten:

- $^{228}\text{Th} \rightarrow ^{224}\text{Ra}$

γ-Energie /keV	84,37	215,98	131,61	166,41
rel. Intensität	1000	207,8	107	84,9

Tabelle 1: Intensive Übergänge bei $^{228}Th \rightarrow ^{224}Ra$, aus [4], S.84

- $^{224}Ra \rightarrow ^{220}Rn$

Energie: 240 keV , **rel. Intensität:** 4,1

- $^{220}Rn \rightarrow ^{216}Po$

Energie: 549,73 keV , **rel. Intensität:** 0,114

- $^{216}Po \rightarrow ^{212}Pb$

Energie: 804,9 keV , **rel. Intensität:** 0,002

- $^{212}Pb \rightarrow ^{212}Bi$

Energie: 238,63 keV , **rel. Intensität:** 100

Energie: 300,09 keV , **rel. Intensität:** 7,57

- $^{212}Bi \rightarrow ^{212}Po \rightarrow ^{208}Pb$

γ-Energie /keV	1620,5	2610	727,3	570
rel. Intensität	2,32	2,6	10,27	2

Tabelle 2: Intensive Übergänge bei $^{212}Bi \rightarrow ^{212}Po \rightarrow ^{208}Pb$, aus [4], S.86

- $^{212}Bi \rightarrow ^{208}Ti$

Energie: 39,86 keV , **rel. Intensität:** 2,96

Energie: 452,98 keV , **rel. Intensität:** 1,01

- $^{208}Ti \rightarrow ^{208}Pb$

γ-Energie /keV	2614,53	583,19	510,77	277,36
rel. Intensität	100	85,2	22,8	6,36

Tabelle 3: Intensive Übergänge bei $^{208}Ti \rightarrow ^{208}Pb$, aus [4], S.87

2.9 Verwendete Geräte

2.9.1 anorganischer Szintillator

(Aus [4], S.73 ff.)

Der im Versuch verwendete anorganische Szintillatoren besitzt einen mit Thallium dotierten Natrium-Iodid Kristall(NaI(Tl)). Ein eindringendes Photon gibt seine Energie durch Photoeffekt oder Comptoneffekt an Elektronen im Kristall ab. Diese Elektronen werden aus dem Valenzband in das Leitungsband angeregt, so dass sie später unter Emmission von Photonen wieder abgeregt werden können. Die Dotierung mit Thalium (Tl) schafft Aktivatorzentren mit zusätzlichen Energie-Niveaus zwischen Valenzband und Leitungsband, so dass die Energie der niederenergetischen Photonen nicht gerade der Breite der Bandlücke entspricht und diese sofort wieder zur Bildung weiterer Elektron-Loch-Paare absorbiert würden.

2.9.2 organischer Szintillator

(Aus [4], S.75 f.) Der im Versuch verwendete organische Szintillator(auch Plastikszintillator) besteht aus einer festen, durchsichtigen Trägersubstanz, in die Aktivatoren in Form einer festen Lösung eingebettet sind. Die einfallende Strahlung erzeugt geladene Teilchen, welche die Moleküle der Plastikträgersubstanz anregen. Diese Energie geht dann auf die Moleküle der Aktivatorsubstanz über, welche beim abregen ein Photon erzeugen. Es existiert allerdings keine Gitterstruktur wie in einem anorganischen Snzintillator. Das führt zu einer gerüngeren Lichtaufausbeute und somit zu einer schlechteren Energieauflösung. Die Zeitauflösung von Plastikszintillatoren ist allerdings besser als bei anorganischen Szintillatoren.

2.9.3 Photomultiplier

Das im Szintillator erzeugte Licht wird über einen Lichtleiter in den Photomultiplier(PM) geleitet. Dort wird das optische Signal mithilfe des Photoeffekts in ein dazu proportionales elektrisches Signal umgewandelt und verstärkt. Im Versuch sind direkt an beiden Szintillatoren je ein Photomultiplier und ein Vorverstärker (Preamplifier, PA) angebracht.

2.9.4 NIM-Schaltungselektronik

Im Versuch werden Geräte des NIM-Standards verwendet.(„Nuclear Instrument Module“): **Vorverstärker** Die Vorverstärker (Pre Amplifier, kurz PA) sind direkt an die Photomultiplier angeschlossen und verstärken das vom Photomultiplier(PM) ausgehende Signal.

Hauptverstärker Die Hauptverstärker (Main Amplifier, kurz MA) dienen der weiteren Verstärkung des Eingangssignals auf ein für die aktuelle Messung gewünschtes Niveau. Sie haben zwei Ausgänge, am unipolaren Ausgang wird ein gaußförmiges Signal erzeugt, während am bipolaren Ausgang ein sinusförmiges Signal ausgegeben wird.

Eingangsdiskriminatör Der Eingangsdiskriminatör oder Einkanalanalysator(single channel analyser, kurz SCA) diskriminiert die vom Hauptverstärker gelieferten Signale nach ihrer

Impulshöhe. Er erzeugt aus ihnen einen rechteckigen Normpuls und erstellt somit ein logisches Signal. Er kann so eingestellt werden, dass er nur Signale in einem bestimmten Energieintervall (dem sog. Fenster) passieren lässt und alle anderen Unterdrückt.

Verzögerungseinheiten Für die Messung der verzögerten Koinzidenzen werden Delays benötigt, damit die Signale auch gleichzeitig ankommen. Diese bestehen aus Kabeln verschiedener Länge die das Signal durchlaufen muss und somit verzögert wird.

Vielkanalanalysator Der Vielkanalanalysator (Multi-Channel-Analyser, kurz MCA) sortiert die eingehenden Signale in anhand ihrer Stärke in verschiedene Kanäle ein. Dabei ist jedem Kanal ein Zähler zugeordnet, der die eingesortierten Signale zählt. Im vorliegenden Versuch ist der MCA an den Computer angeschlossen und ein Programm zählt die Signale.

linear Gate Das linear Gate leitet Signale die ihm über den Input gegeben werden nur an den Output weiter, wenn gleichzeitig ein logisches Signal am Enable-Eingang ankommt. Dabei kann die Zeit, die das Gate pro Signal offen ist eingestellt werden(Gate width).

Timing Unit Die Timing-Unit verarbeitet eingehende, negative, logische Signale in ausgehende Rechtecksignale einstellbarer Breite.

Coincidence Unit Die Koinzidenzunit misst auftretende Koinzidenzen. Treffen Signale zeitgleich ein wird ein logisches Ausgangssignal erzeugt.

HEX Counter Ein Hex-Scaler wird als Zähler verwendet, er hat mehrere Eingänge und zählt eingehende logische Pulse.

3 Versuchsaufbau und Durchführung

3.1 Aufnahme der Spektren

Zur Aufnahme der Spektren wurde folgende Schaltung verwendet, wobei in rot die Pulsformen angedeutet sind:

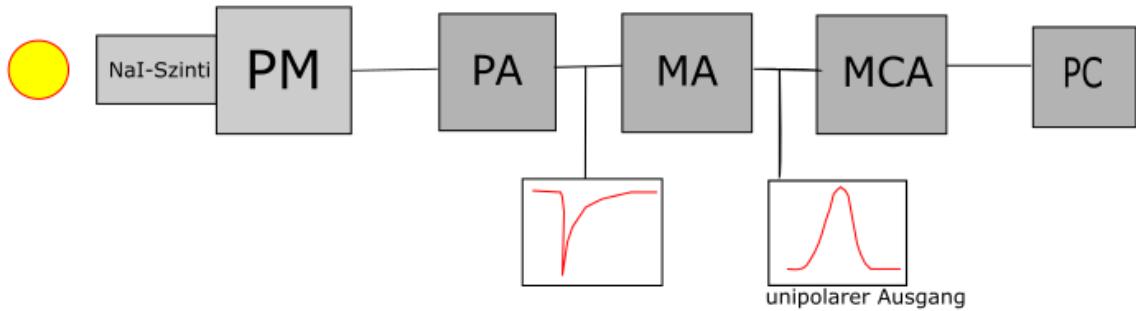


Abbildung 4: Blockschaltbild1: Aufnahme der Spektren: NaI-Szinti:anorganischer Szintillator, PA:Pre Amplifier, MA:Main Amplifier, MCA:Multi Channel Analyser

Dabei wurden zunächst die Signale mit dem Oszilloskop bei verschiedenen Einstellungen beobachtet. Die Einstellung des Main Amplifiers wurde mithilfe des ^{22}Na bestimmt, so dass auch der höchste zu erwartende Peak des ^{228}Th -Spektrums bei 2615 keV noch auf dem MCA zu sehen sein könnte. Dann wurden die Spektren der Präparate ^{22}Na , ^{60}Co und ^{152}Eu jeweils eine halbe Stunde lang aufgenommen um die Energieeichung durchführen zu können. Aus Gründen der Zeitoptimierung wurde dann zunächst die Koinzidenzmessung durchgeführt.

Über Nacht wurde das Spektrum von ^{228}Th aufgenommen und anschließend eine dreistündige Untergrundmessung durchgeführt.

3.2 Koinzidenzmessung

Zur Aufnahme der Koinzidenz der Paarvernichtung wurde die in Abbildung 5 dargestellte deutlich komplexere Schaltung verwendet. Während des Aufbaus wurden die verschiedenen Signale mit dem Oszilloskop überprüft. Es wurde mit dem in der Abbildung rechts dargestellten anorganischen Szintillator begonnen. Dieser wurde an einen MA angeschlossen. Der unipolare Ausgang des MA wurde über das Gate an den MCA übertragen und am PC dargestellt. Gleichzeitig wurde das bipolare Signal an den SCA übertragen und dort in einen logischen Impuls umgewandelt, der das Gate geöffnet hat. So konnte am SCA das Fenster auf den 511 keV-Vernichtungspeak eingestellt werden. Der Negative Ausgang des SCA lieferte eines der beiden Signale für die Koinzidenz. Dieses wurde in der Timing Unit aufbereitet und im HEX-Zähler überprüft.

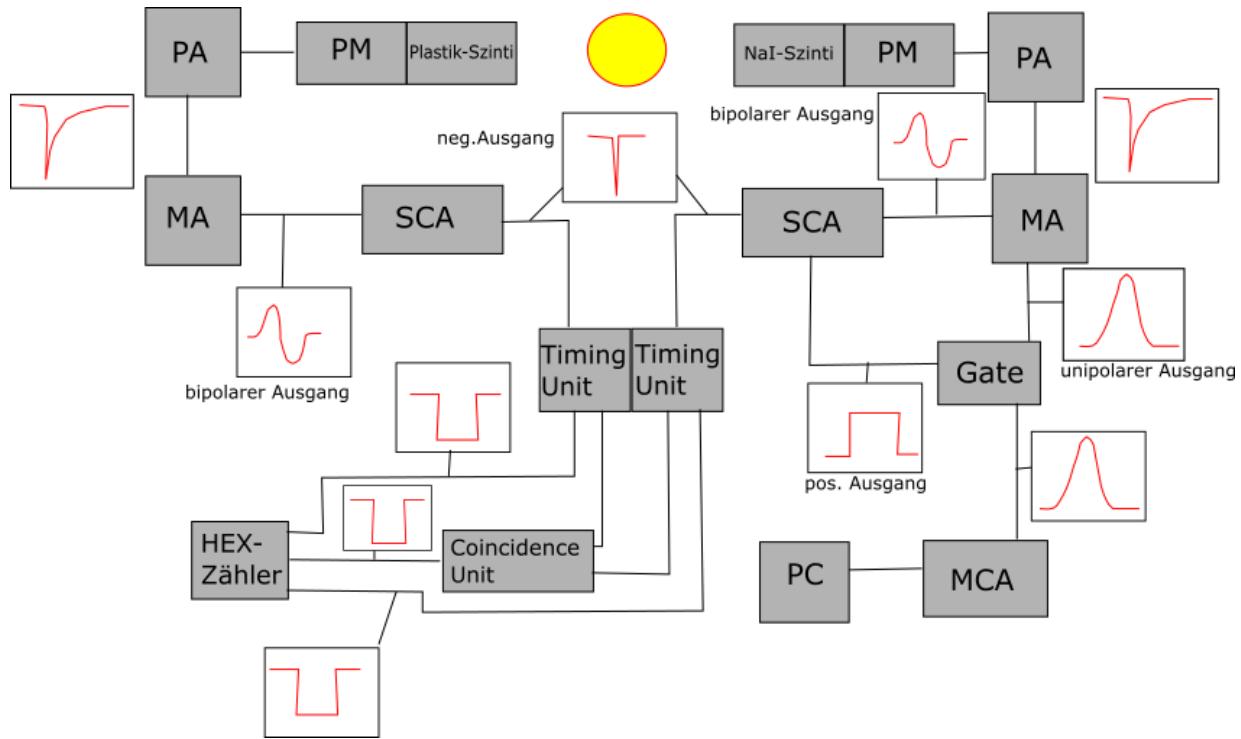


Abbildung 5: Blockschaltbild2: Messung der Koinzidenz, Gelber Kreis: ^{22}Na (mit 511 keV-Vernichtungsspeak), NaI-Szinti:anorganischer Szintillator, PM:Pre Amplifier, MA: Main Amplifier, SCA: Single Channel Analyser, Gate: lineares Gate, MCA:Multi Channel Analyser, Plastik-Szinti: organischer Szintillator

Dann wurde der (in der Abbildung linke Teil) der Schaltung mit dem organischen Szintillator aufgebaut. Dieser ist wie in der Abbildung zu sehen dem anderen Teil sehr ähnlich, mit dem Unterschied, dass hier kein Fenster gesetzt wurde, sondern sämtliche Signale gezählt werden und das Spektrum auch nicht am PC angesehen wird, sondern nur die Koinzidenz wichtig wurde. Anschließend wurde mit dem Oszilloskop und einer anschließenden Messreihe das richtige Delay gesucht um Koinzidenz zu erreichen, die Messreihe mit verschiedenen Winkeln durchgeführt und die zufälligen Koinzidenzen gemessen.,0

4 Auswertung und Diskussion

Für die Auswertung und Erstellung der Graphen wurde, wen nicht anders erwähnt, Origin (Version: 2016G 64Bit) verwendet.

4.1 Versuchsteil 1: Energiekalibrierung und Analyse der Spektren

4.1.1 Oszilloskopaufnahmen

Vor der Aufnahme der Spektren wurden die erwarteten Signale am Oszilloskop überprüft. Zuerst untersuchten wir den Main Amplifier, folgende Abbildung zeigt eine Aufnahme dessen Eingangssignales und beider Ausgangssignale:

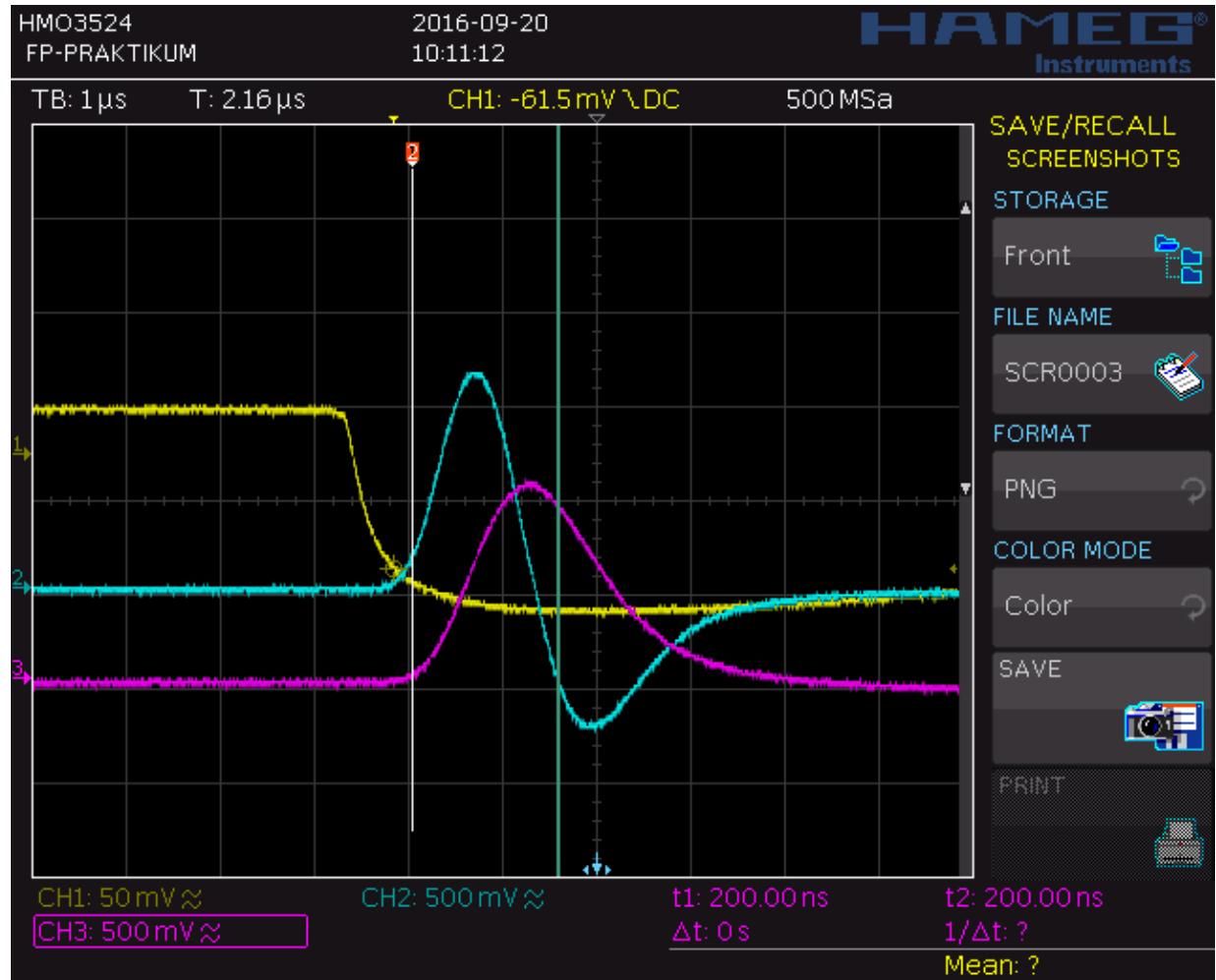


Abbildung 6: Oszilloskopaufnahme: Signale des Main Amplifiers, Gelb:Eingangssignal, Violett: unipolares Ausgagssignal, Hellblau: bipolares Ausgangssignal

Darin ist zunächst zu erkennen, dass der Amplifier das Eingangssignal verstärkt (im Bild hier um etwa eine Größenordnung). Weiterhin sieht man den Unterschied zwischen unipolarem Signal(violett) und bipolarem Signal(hellblau). Das unipolare Signal ist eine Gaußkurve, es eignet sich zur Bestimmung der Energiehöhe. Dagegen ist das bipolare Signal eine Sinuskurve mit dem Nulldurchgang an der Stelle, an der das unipolare ein Maximum hat. Es eignet sich zur Umwandlung in ein logisches Signal. Auch lässt sich eine Verzögerung zwischen Eingangs und Ausgangssignal beobachten.

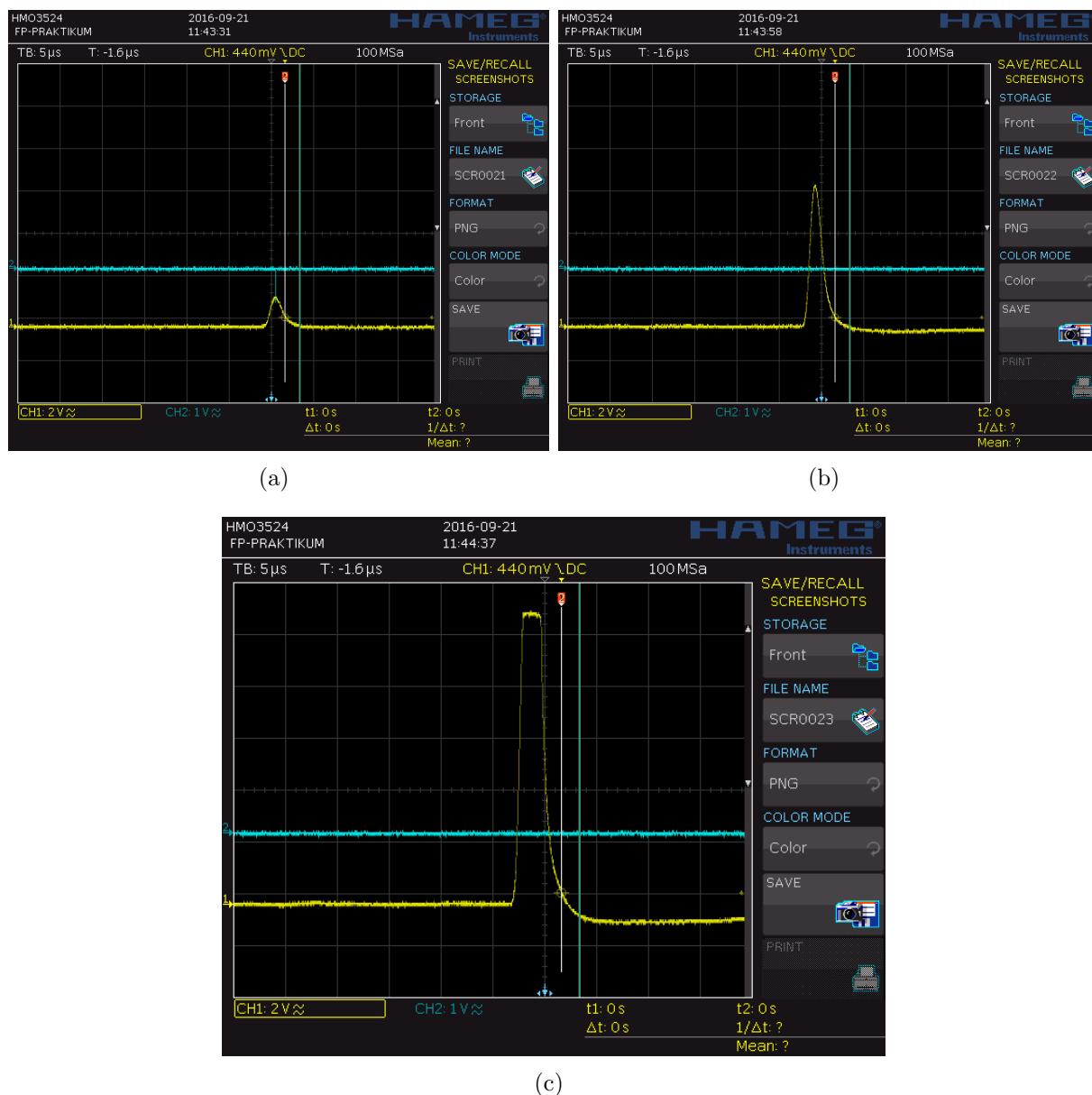


Abbildung 7: verschieden starke Verstärkung durch den Amplifier bei gleichem Eingangssignal

In Abbildung 7 sind unterschiedlich stark verstärkte unipolare Ausgangssignale aus dem MA. In Teil c ist die Verstärkung übertrieben, so dass die höchsten Stellen des gaußförmigen Impulses abgeschnitten wurden.

Weiterhin kann am Main Amplifier über die Shaping Time die Länge der Signale eingestellt werden.

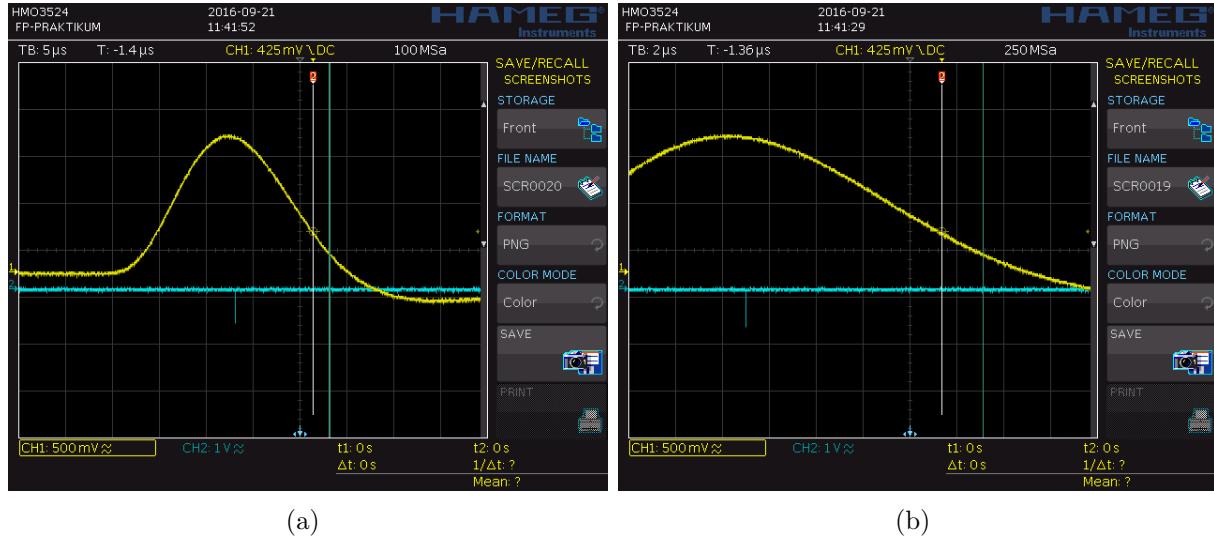


Abbildung 8: verschiedene Shaping Time des Amplifiers bei gleichem Eingangssignal

Abbildung 8 zeigt Ausgangssignale des MA unterschiedlicher Länge bei gleichem Inputsignal.

4.1.2 Energiekalibrierung

Um bei der Auswertung der Spektren den gemessenen Kanälen eine Energie zuweisen zu können, wurde mit ^{22}Na , ^{153}Eu und ^{60}Co eine Energiekalibrierung durchgeführt.

Um diese durchzuführen wurde mit der Natriumprobe die Verstärkung des MA eingestellt. Dafür wurde der 511 keV-Peak des ^{22}Na so positioniert, dass der 2614,5 keV-Peak des für die Hauptmessung benutzten $^{228}\text{Thoriums}$ sich noch in dem eingestellten Messbereich befindet. Dabei wurde die Annahme ausgenutzt, dass zwischen der Energie und den gemessenen Kanälen ein linearer Zusammenhang herrscht.

Für die Kalibrierung wurden aus den Daten der einzelnen Messreihen ohne Zählrate bestimmt. Dieser Schritt ist vor allem nötig, da von den Messdaten noch der Untergrund abgezogen werden muss, da die Messreihen ca eine halbe Stunde liefen, während die Untergrundmessung über 3 Stunden aufgenommen wurde. Für die Zählrate n (bzw. der Untergrundzählrate u) gilt also:

$$n = \frac{N}{t} \quad (1)$$

Dabei ist N (bzw für den Untergrund ist es U) die Anzahl der Counts die gemessen wurden. t bezeichnet die gemessene Zeit abzüglich der Totzeit (Die Totzeit ist dabei die Zeit, bei der durch den Szintillator keine Ereignisse aufgenommen werden konnten). Die reale Messzeit wurde den Messdaten entnommen, da diese wie auch die Gesamtzeit in den Messdaten in den ersten beiden Einträgen aufgeführt wird. Für den Fehler gilt:

$$s_N = \frac{\sqrt{N}}{t} \quad (2)$$

\sqrt{N} (analog für \sqrt{U} wird dabei als Fehler auf die Counts genommen, da für die radioaktiven Zerfälle die Poissonverteilung gilt. Auf die Messzeit wurde kein Fehler angenommen, da über das Messprogramm keine Fehlerinformation vorlag und der Fehler wahrscheinlich vernachlässigbar klein ist.

Somit ergibt sich für die korrigierte Zählrate n' ,

$$n' = n - u \quad (3)$$

$$s_{n'} = \sqrt{s_n^2 + s_u^2} \quad (4)$$

Die korrigierten Messwerte der drei Proben (Na, Co und Eu) wurden nun über die gemessenen Kanäle mit Origin aufgetragen. Um den Zusammenhangs Energie - Kanal herstellen zu können müssen die im Spektrum zu sehenden Peaks bestimmt werden. Dabei werden die Peaks durch einen Gaußfit angepasst (in Origin: Analyse → Anpassen → nicht linearer Fit → Gauss).

Den dadurch bestimmten Kanälen wurden die bereits bekannten Energien zugewiesen (Die Energien wurden der Theorie entnommen, siehe 2.8). Die Grafiken wurden inklusive Fehlerbalken erstellt. Dabei wurde $s_{n'}$ als y-Fehler genommen. Auf die Kanäle wurde kein Fehler angenommen, da die Kanäle vom Messprogramm vorgegeben werden und der Fehler somit als nicht vorhanden angesehen wird.

- **Natrium**

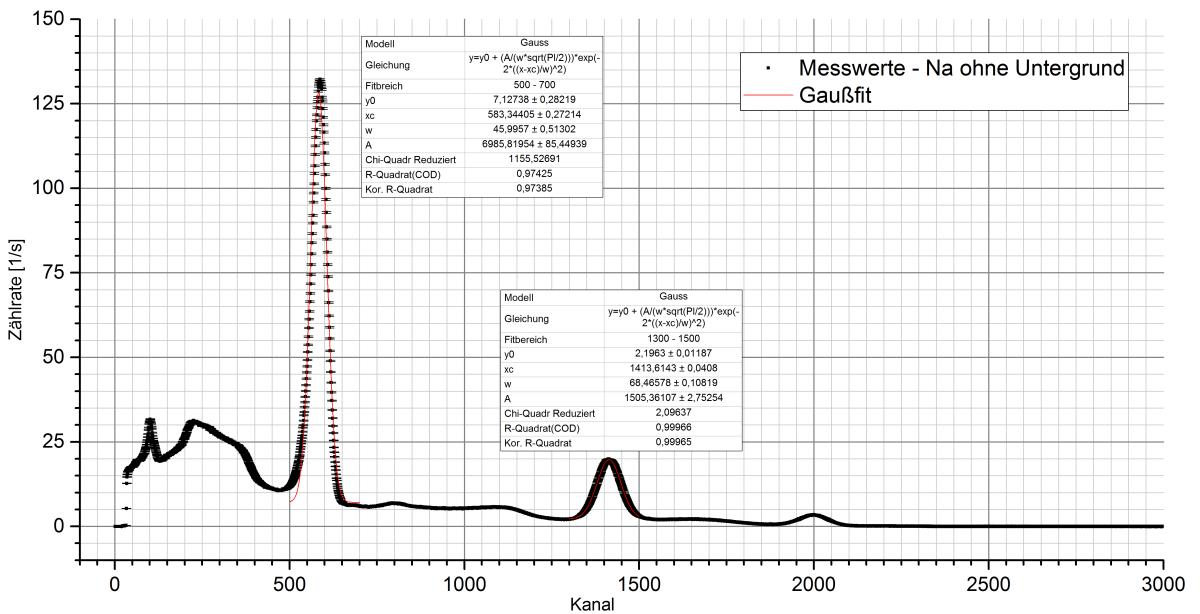


Abbildung 9: Aufnahme des Natriumspektrum zur Energiekalibrierung. Inkl. Gaußfit des 511 keV- und des 1274,6 keV-Peaks.

Zur Veranschaulichung wurde der kleinere Peak (für 1274,6 keV) nochmals vergrößert dargestellt.

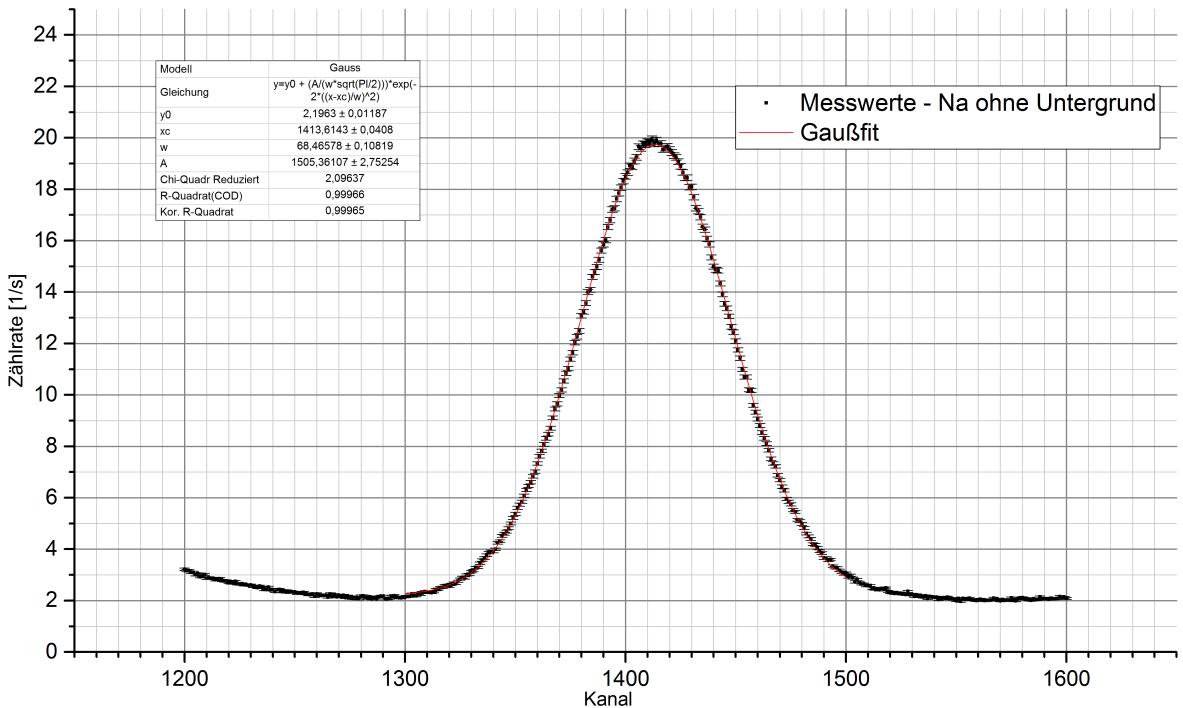


Abbildung 10: Nahaufnahme des 1274,6 keV-Peaks, inkl. Gaußfit

Aus den Ergebnissen des Gaußfits kann sowohl der Kanal des Peaks als auch der Fehler bestimmt werden, dabei gilt:

$$x_c \hat{=} \text{Erwartungswert für den Kanal}$$

$$w \hat{=} \text{Full Width Half Maximum (FWHM)}$$

Der Fehler auf den bestimmten Kanal beläuft sich dabei auf

$$s_{xc} = \frac{w}{2} \quad (5)$$

Dieser Fehler wird als so groß eingeschätzt, dass mögliche Fehler des Geräts oder des Messprogramms als insignifikant angesehen werden.

Die Werte der Tabellen in den einzelnen Graphen für R-Quadrat stehen dafür wie gut der Gaußfit die Werte anpassen kann. Dabei sollte der Wert so nah wie möglich an 1 liegen. Für die hier erstellten Graphen liegt der niedrigste Wert bei 0,97, was bedeutet, dass die Werte mit dem Fit zu 97 erklärbar sind und somit kann der Fit als gut eingestuft werden. Ein weiterer Faktor, um die Korrektheit des Fits zu beschreiben, stellt das $\chi\%$ da. Dieses sollte so nah wie möglich bei 0 liegen.

Für die beiden anderen Proben wurde Analog vorgegangen.

- Cobalt

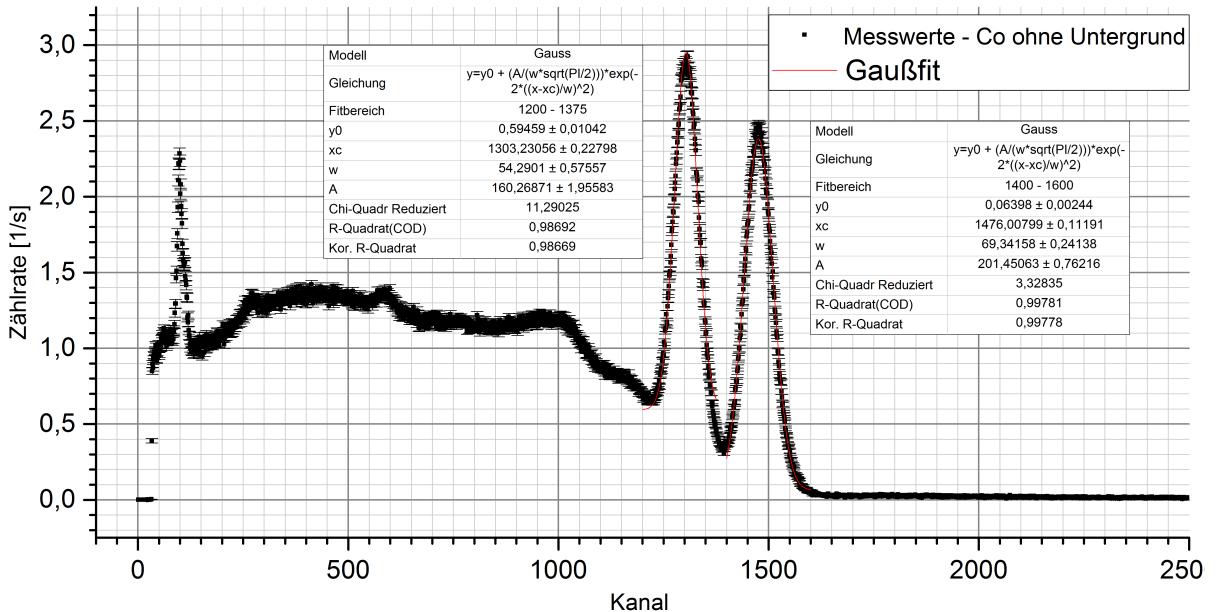


Abbildung 11: Aufnahme des Cobaltspektrum zur Energiekalibrierung. Inkl. Gaußfit des 1173,2 keV- und des 1332,5 keV-Peaks.

- **Europium**

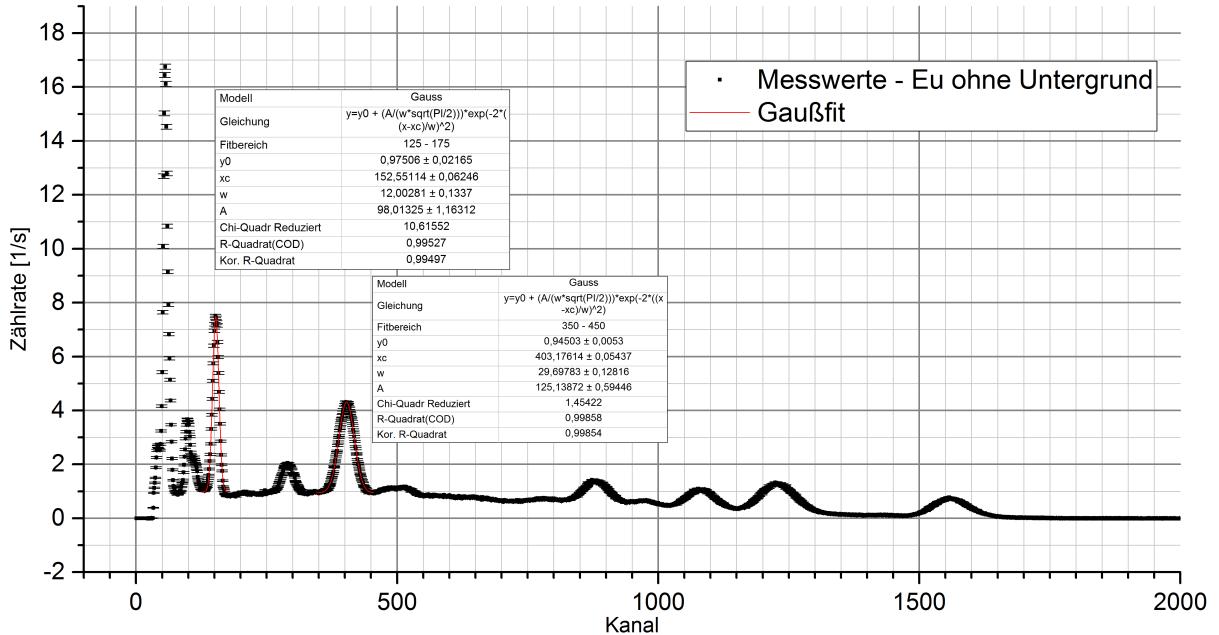


Abbildung 12: Aufnahme des Europiumspektrum zur Energiekalibrierung. Inkl. Gaußfit des 122 keV- und des 344 keV-Peaks.

Somit ergibt sich für die Energiezuteilung folgende Werte. Die ausgewählten Energien (jeweils zwei charakteristische Werte pro Probe) werden über die bestimmten Kanäle mit ihren Fehlern aufgetragen. Dabei wird auf die Energiewerte kein Fehler angenommen, da diese aus der Literatur genommen wurden [4] und somit ein vernachlässigbarer Fehler angenommen wird.

Probe	Kanal	Energie / keV
Na	(583 ± 23)	511
Na	(1414 ± 34)	1274,6
Co	(1303 ± 27)	1173,2
Co	(1476 ± 35)	1332,5
Eu	(153 ± 6)	122
Eu	(583 ± 15)	344

Tabelle 4: Zuweisung der Energie zu den bestimmten Kanälen inkl. Fehler

Diese Werte werden nun in der Grafik 13 aufgetragen und dann mit einem linearen Fit bearbeitet (in Origin: Analyse \rightarrow Anpassen \rightarrow Linearer Fit mit X-Fehlern).

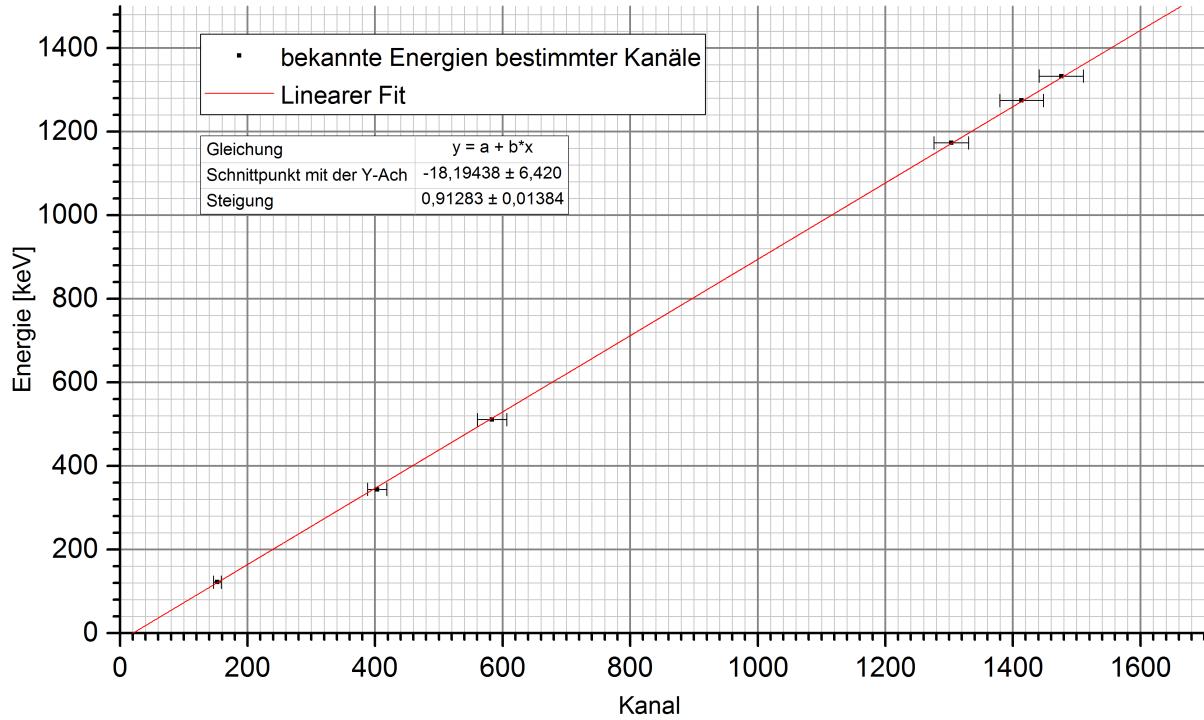


Abbildung 13: Auftragung der bestimmten Kanäle und den zugehörigen Energien. Linearer Fit zur Bestimmung einer Formel um Kanäle in Energien umzurechnen. $a \hat{=} Y$ -Achsenabschnitt und $b \hat{=} \text{Steigung}$

Für diesen Fit gilt:

$$Y = a + b \cdot X \quad (6)$$

Mit den Werten für $a = (-18,2 \pm 6,)$ keV und $b = (0,913 \pm 0,014)$ keV (Diese Werte wurden direkt Origin entnommen und können der Abb. 13 entnommen werden) gilt:

$$\text{Energie [keV]} = (-18,2 \pm 6,) + (0,913 \pm 0,014) \cdot \text{Kanal} \quad (7)$$

Für den Fehler auf die Umrechnung der Energie wird mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung folgende Formel bestimmt:

$$s_{\text{Energie}} = \sqrt{s_a^2 + s_{\text{channel}}^2 \cdot b^2 + s_b^2 \cdot \text{Kanal}} \quad (8)$$

Mit dieser Umrechnung werden die mit einem Gaußfit bestimmten Kanäle in den Kapiteln 4.1.3 bis 4.1.7 in die zugehörigen Energien umgerechnet. Dies ist vor allem beim Thorium-Spektrum wichtig um die einzelnen Peaks den zugehörig Zerfällen zuweisen zu können.

4.1.3 Spektrum ^{22}Na

In den Kapiteln 4.1.3 bis 4.1.7 werden die Spektren genauer analysiert und versucht die auftretenden Peaks zu bestimmen und herauszufinden, um welche Art von Peak es sich handelt. Dafür wurden die Messdaten wie in Kapitel 4.1.2 beschreiben mit dem Untergrund korrigiert und mit Hilfe von Gaußfits angepasst. Neben den hier erstellten Graphen befinden sich im Anhang A noch Screenshots der vom Messprogramm aufgenommen Graphen, an denen sich orientiert wurde um Peaks zu finden.

4.1.4 Spektrum ^{60}Co

4.1.5 Spektrum ^{153}Eu

4.1.6 Hauptmessung Spektrum ^{228}Th

4.1.7 Untergrundmessung

4.2 Versuchsteil 2: Koinzidenzmessung

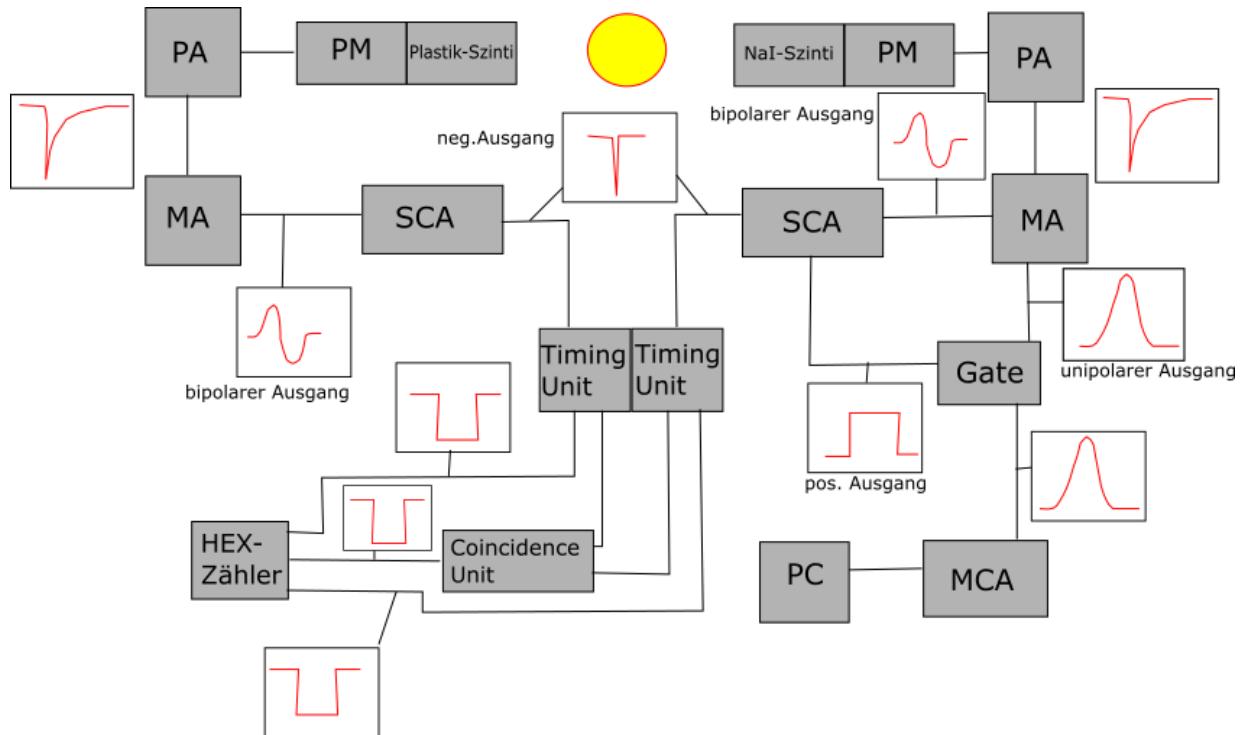


Abbildung 14: Blockschaltbild2: Messung der Koinzidenz, Gelber Kreis: ^{22}Na (mit 511 keV-Vernichtungspeak), NaI-Szinti:anorganischer Szintillator, PM:Pre Amplifier, MA: MAin Amplifier, SCA: Single Channel Analyser, Gate: lineares Gate, MCA:Multi Channel Analyser, Plastik-Szinti: organischer Szintillator

4.2.1 Aufbau der Schaltung

Während des Aufbaus der Schaltung zur Koinzidenzmessung wurden einige Oszilloskopbilder aufgenommen, um die Signale, die im Blockschaltbild rot angedeutet sind zu überprüfen. Zunächst wurde der Single Channel Analyser untersucht(da der Main Amplifier bereits für die vorherige Schaltung untersucht worden war, siehe Abbildung 6) und je ein Bild des positiven Ausgangssignals und des negativen Ausgangssignals erstellt.

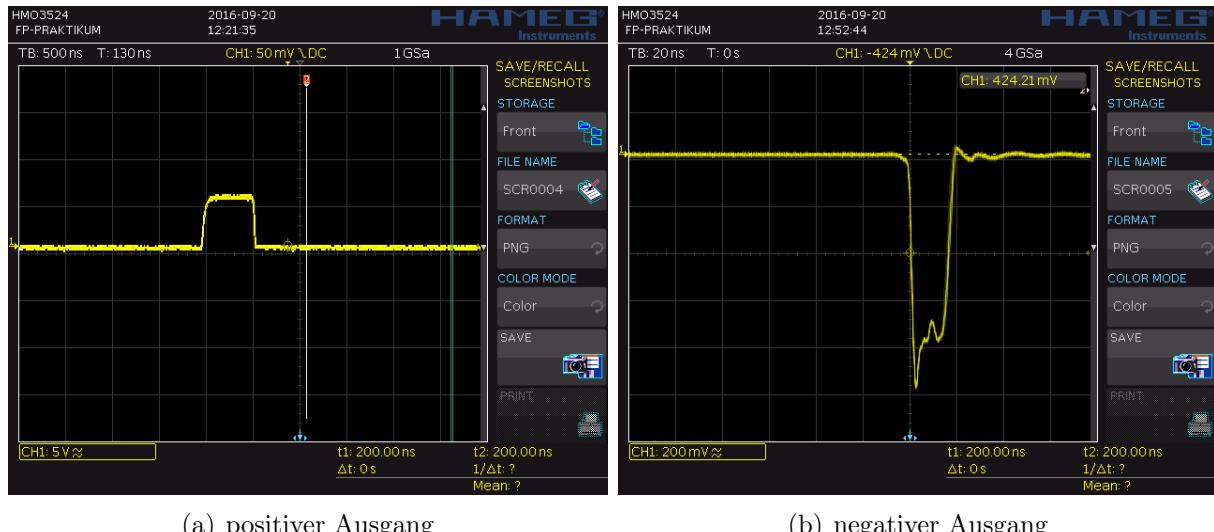


Abbildung 15: Aufnahmen der Ausgänge des SCA

Das Eingangssignal ist immer das bipolare Ausgangssignal des Main Amplifiers. Dieses wird vom SCA in ein logisches Signal umgewandelt, mit dem entweder das Gate geöffnet oder die Koinzidenz gemessen werden kann.

Das positive Ausgangssignal des SCA wird verwendet, um das lineare Gate zu öffnen. Das führt zu einem in Abbildung 16 gezeigten Ausgangssignal, dessen breite Einstellbar ist.

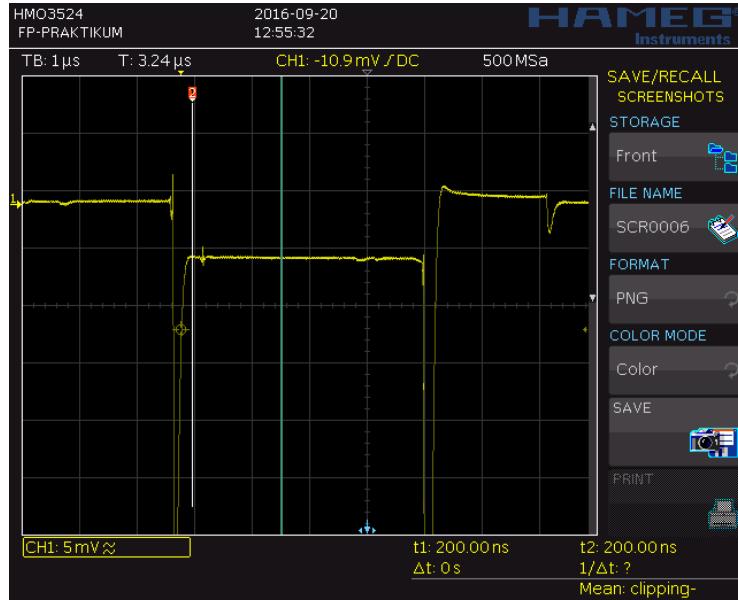


Abbildung 16: Ausgangssignal des linearen Gates

Kommt gleichzeitig ein Eingangssignal an, überlagert sich das wie in Abbildung 17 mit einem unipolaren Eingangssignal gezeigt.

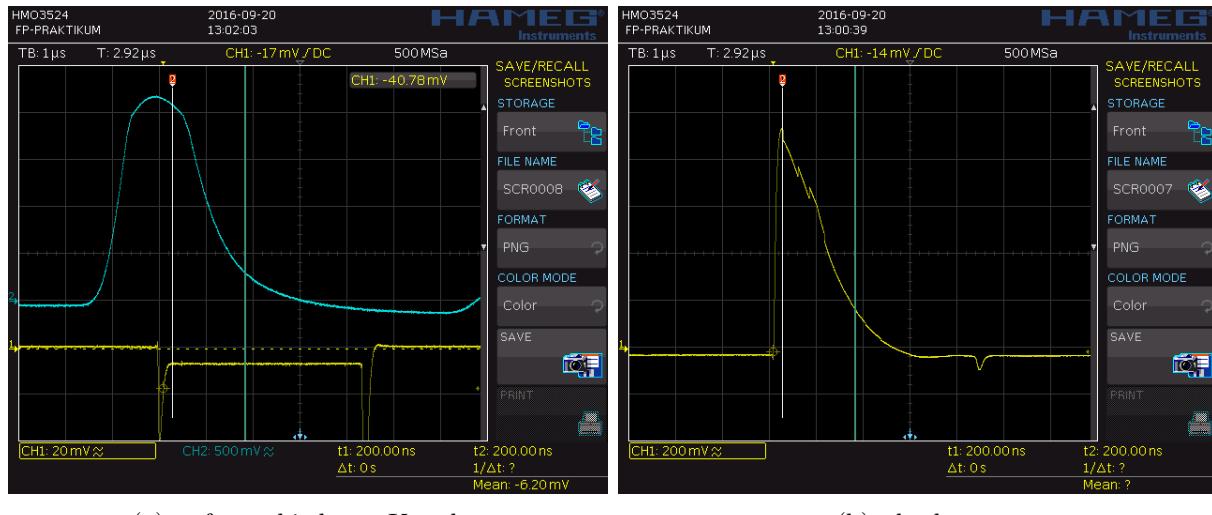


Abbildung 17: Das lineare Gate und der unipolare Puls

Dabei ist in Abbildung 17 a nochmals das Ausgangssignal des Gates gezeigt, wenn ein logisches Enable-Signal vom SCA ankommt sowie in blau das unipolare Inputsignal aus

dem Main Amplifier. Abbildung 17 b zeigt die Überlagerung dieser beiden und somit das tatsächliche Outputsignal. Dabei ist zu sehen, wie das lineare Gate Signale unterdrückt(bzw. hier abschneidet), wenn kein Enable-Signal vorliegt.

An der Timing Unit liegt das positive Ausgangssignal des SCAs. An ihr lassen sich die Länge der Peaks verändern und auch deren Polung einstellen.

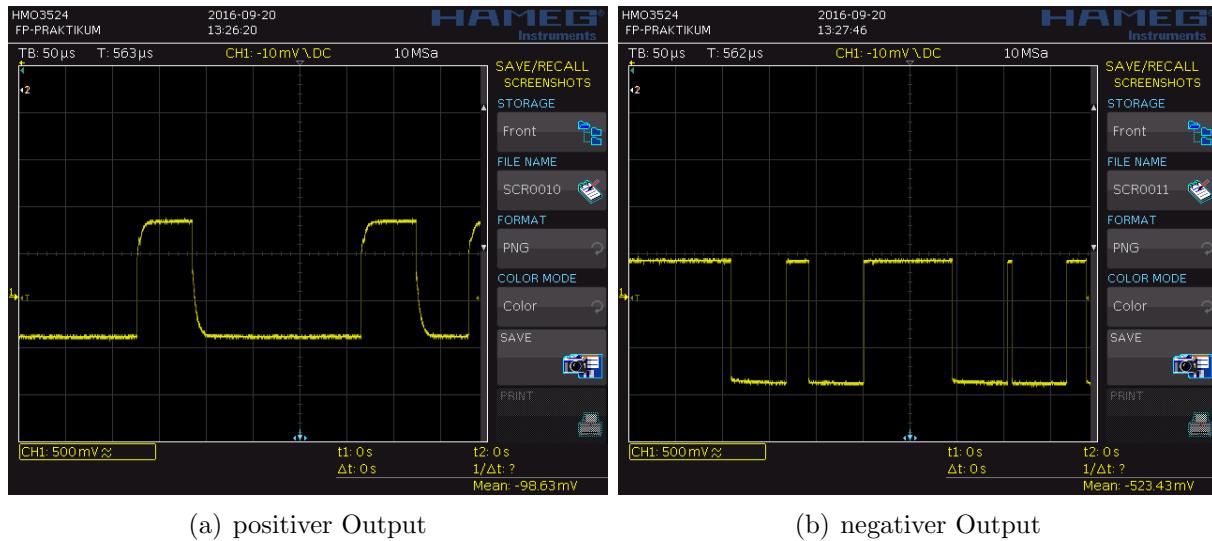


Abbildung 18: Output der Timing Unit

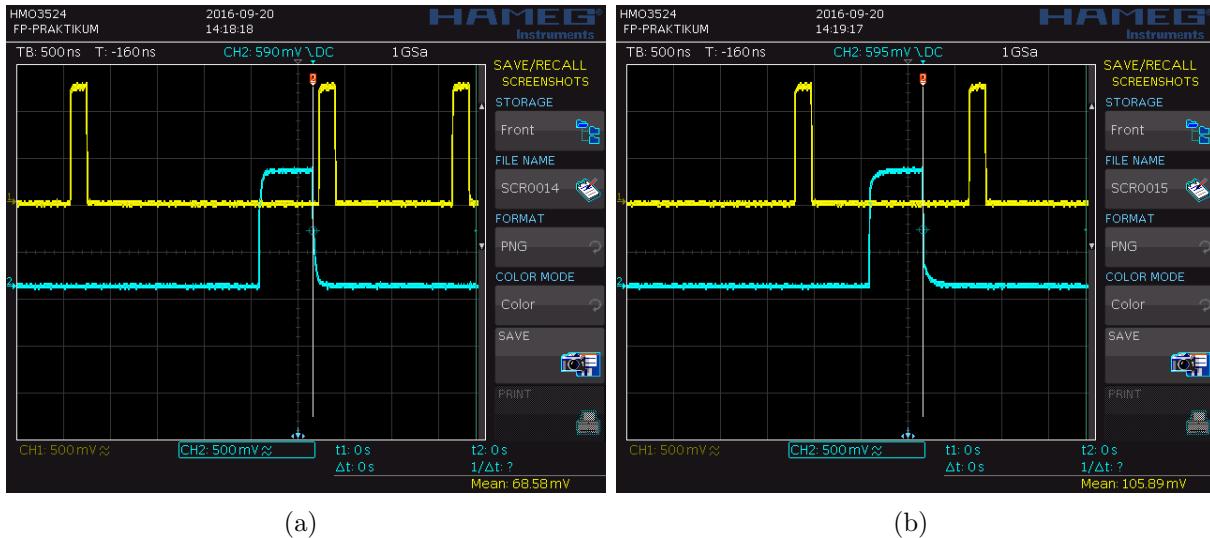
Gemäß dem Schaltplan in Abbildung 14 werden so zwei Pulse über die Timing Unit in die Koinzidenzeinheit geleitet. Diese gibt bei Koinzidenz einen Puls an den Hex-Zähler weiter. In Abbildung 4.2.2 sieht man das Signal der beiden Timing Units, die so in die Koinzidenzeinheit geschickt werden. Mit diesem Bild (4.2.2) auf dem Oszilloskop und noch einer anschließenden Messreihe wurde die optimale Verzögerung für die Koinzidenzen eingestellt. Wider erwarten musste dafür schließlich der anorganische (NaI-)Szintillator verzögert werden.

Zur Überprüfung der Schaltung wurden auch die beiden Signale aus der Timing Unit am Hex-Zähler gezählt. Da am Hex-Zähler dann deutlich mehr Signale aus dem organischen (Plastik-)Szintillator ankamen als aus dem anorganischen (NaI-)Szintillator und auch diese noch deutlich mehr waren als Koinzidenzen auftraten konnte so die Plausibilität der Schaltung bestätigt werden.

4.2.2 Koinzidenzmessung

In Abbildung 20 sind die gemessenen Koinzidenzen für die jeweiligen Winkel aufgetragen. Dabei wurden die gemessenen zufälligen Koinzidenzen bereits abgezogen.(Alle Rohdaten im Originalprotokoll im Anhang, B)

Wir erwarten eine starke Winkelabhängigkeit von 180° . In Abbildung 20 liegt der Nullpunkt bei 180° .



(a)

(b)

Abbildung 19: beide Signale aus der Timing Unit für die Koinzidenz Unit

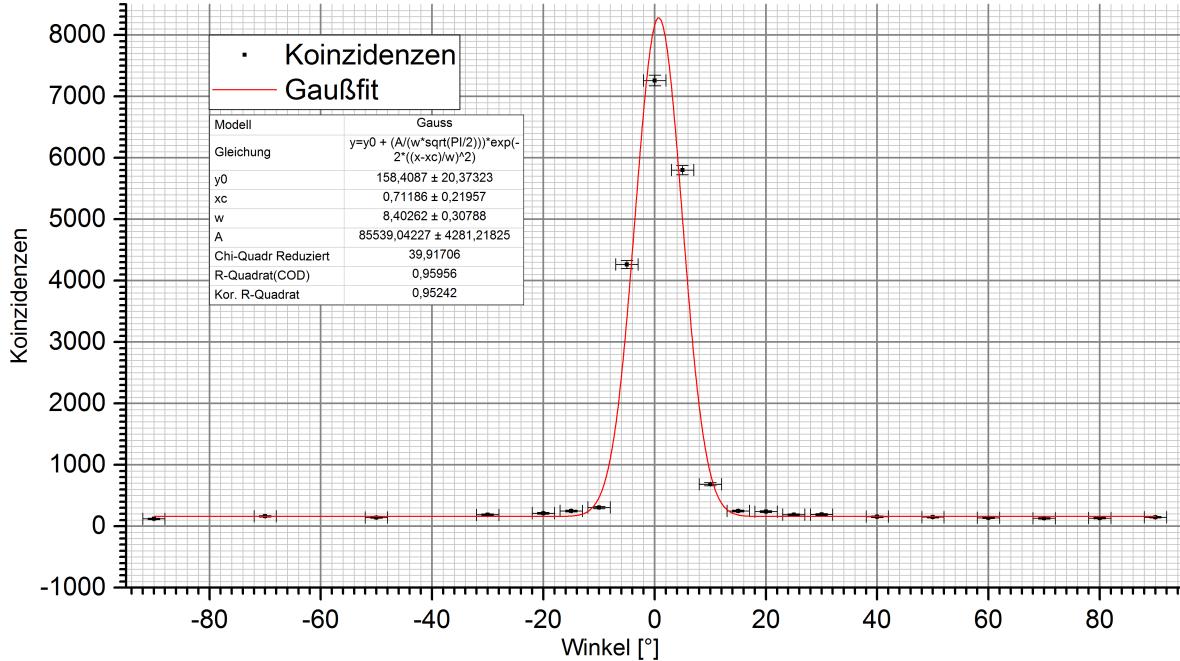


Abbildung 20: Gaußfit der Winkelabhängigkeit der Paarvernichtungskoinzidenzmessung

Wir erhalten eine sehr starke Winkelabhängigkeit. Das Maximum liegt beim Winkel:

$$\theta = 180, 71^\circ$$

Als Fehler für den Fit wurde auf jeden Winkel zwei Grad geschätzt. Der y-Fehler resultiert aus der Annahme der Poissonverteilung.(Mit dem (kleinen) Fehler auf den Untergrund.)

Aus dem Fit bekommen wir ein FWHM von $8,4^\circ$.

$$\rightarrow \theta = (180, 7 \pm 8, 4)^\circ$$

Damit bestätigt sich die vermutete sehr starke Winkelabhängigkeit der Paarvernichtung.
Die Bewegungsrichtung der γ -Quanten aus der Paarvernichtung ist antikorreliert.

5 Zusammenfassung

5.1 Erster Teil: Analyse des Spektrums von ^{228}Th

5.2 Zweiter Teil: Winkelabhängigkeit der Paarvernichtung

Mithilfe einer Koinzidenzschaltung und eines drehbaren Plastiksintillators wurde der Winkel zwischen den beiden γ -Quanten der Paarvernichtung gemessen. Dabei erhielten wir für den Winkel zwischen beiden γ -Quanten:

$$\rightarrow \theta = (180, 7 \pm 8, 4)^\circ$$

Damit konnte als Winkelabhängigkeit eine signifikante Antikorrelation bestätigt werden.

A SCREENSHOTS DER SPEKTREN WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG

A Screenshots der Spektren während der Durchführung

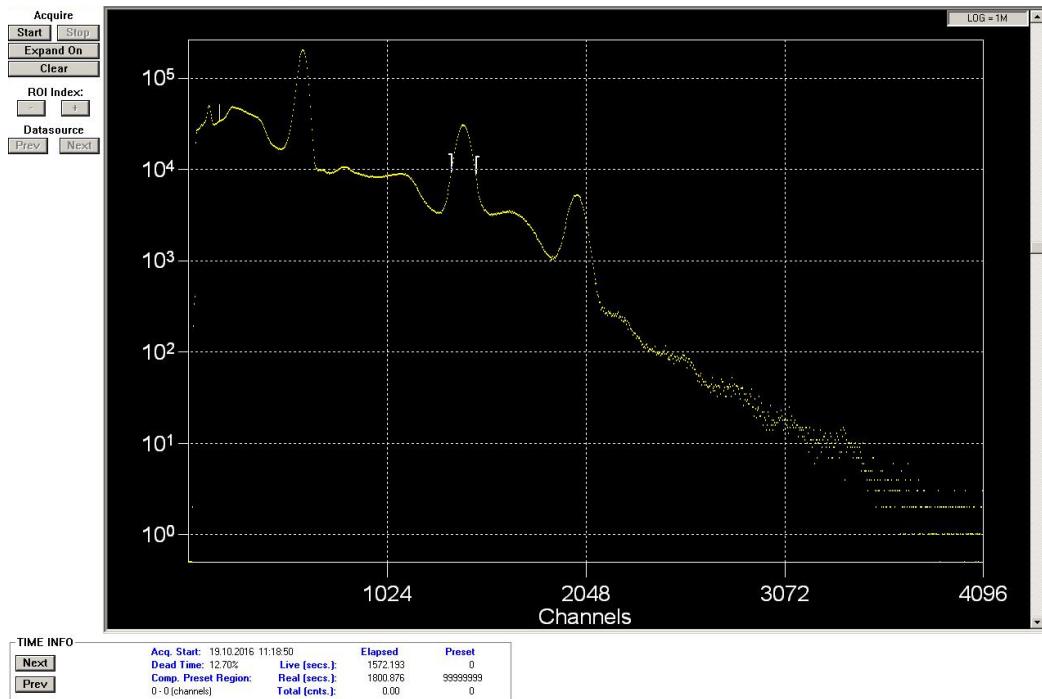


Abbildung 21: Natriumspektrum, Screenshot

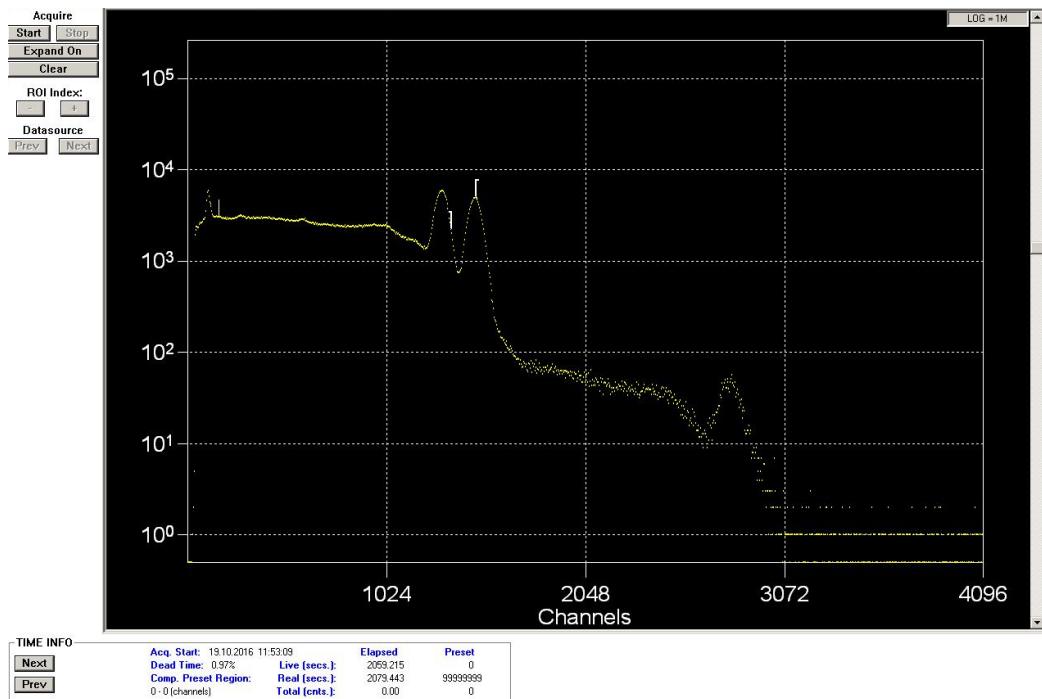


Abbildung 22: Cobaltspektrum, Screenshot

A SCREENSHOTS DER SPEKTREN WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG

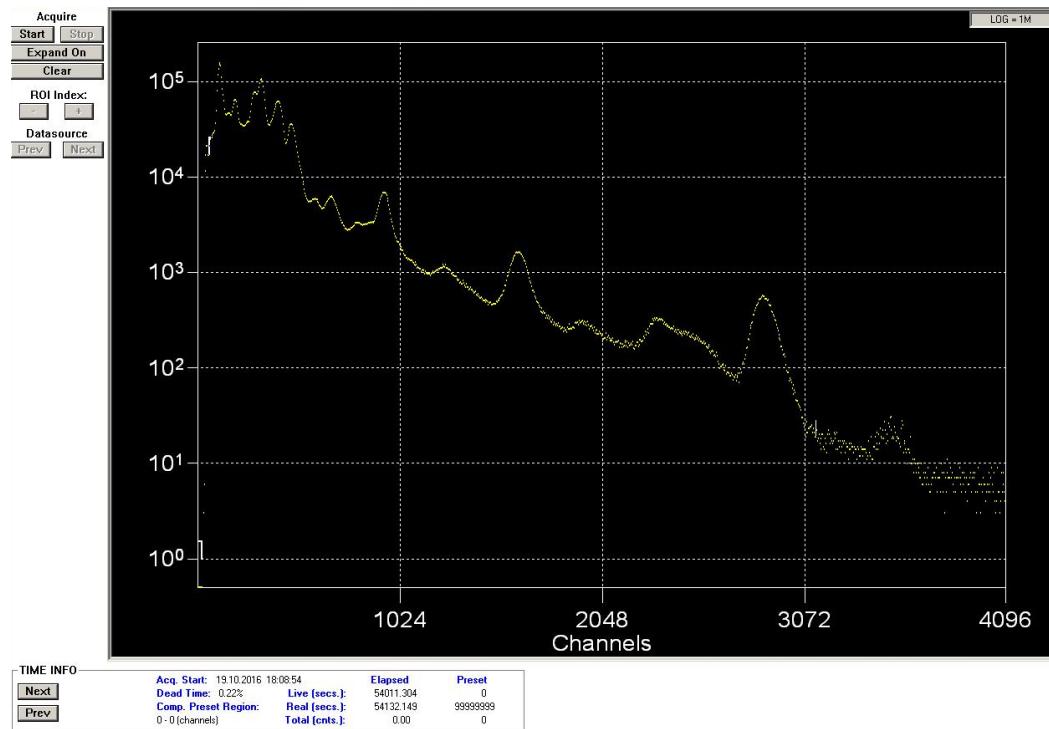


Abbildung 23: Thoriumspektrum, Screenshot

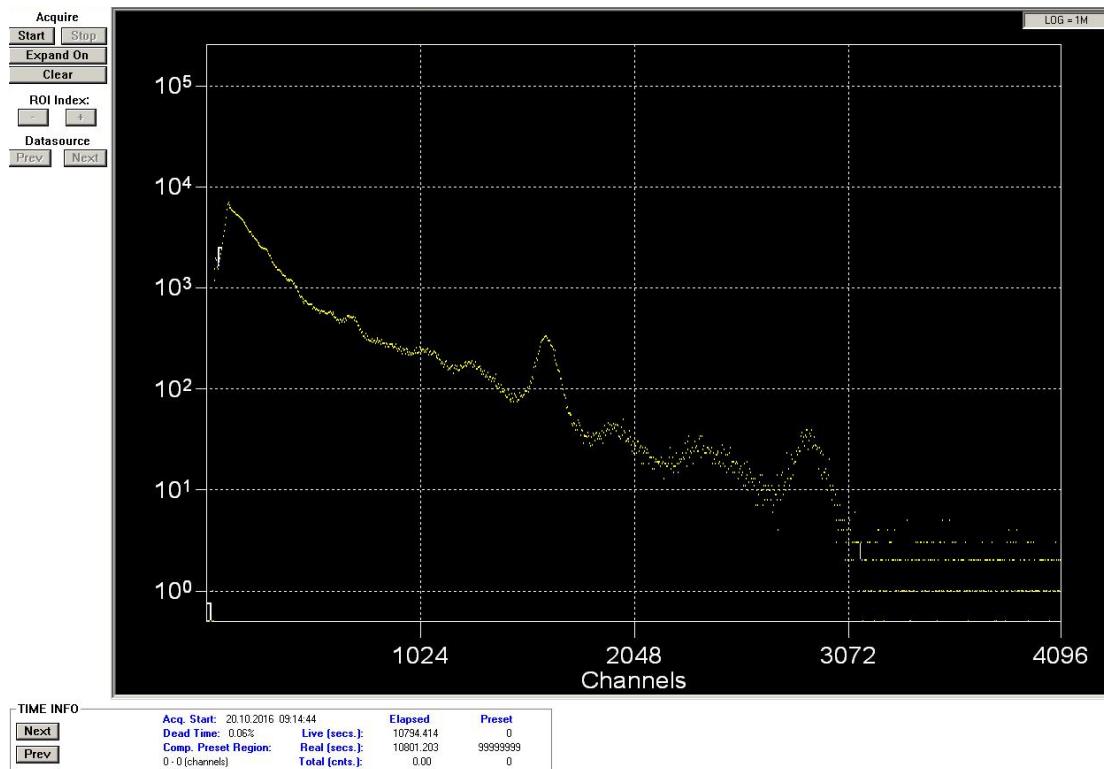


Abbildung 24: Untergrundmessung, Screenshot

B Originalprotokoll

①

Scintillationszähler

Bild 7 - §3 - Vergleich unipolar - bipolar

NaI-Scinti

- 4 - Positiver Detekt SCA - Delay Odds
 Delay einsetzt Signal nicht sichtbar
 (dav. kein ~~ein~~ vergleicher signal)
- 5 - Negativer Output
- 6 - Aufzeichnung Gate
- 7 - Gate überlagert mit Unipolar Puls
- 8 - Gate + Puls getrennt
- 9 - SCA - Na Negativer Output (in die timing unit)
- 10 - timing unit OUT
- 11 - timing unit OUT

Blasent-Scinti 12 - pos. SCA, mit Bipolar

13 - neg. SCA,

14 - Glass-Vial - gelbe Blasentis
 \rightarrow Koinzidenzen

15 - " "

16 - Shaping time 0,5 μs,
 unipolares Signal, durch bipolar getriggert

17 - Shaping time 2 μs

18 - wie 16, nur auf Band 1 getriggert

19 - shaping time 6 2 μs

20 - shaping time 8 5 μs

21 - mouse gain ab 20

22 - " " 200

23 - 200 Sättigung?

24 - " " "

25 - 0,5 ms time 20 mouse gain

Tobit

②

MCA-Messungen:

1. ^{22}Na $t = 7800, 97$
2. ^{60}Co $t = 2079, 44$
3. ^{152}Eu $t = 1927, 92$

NaI: gain 6.0 (amplifier) coarse gain 20
Shaping time 0.5 μs
~~Beobachtete Signaländerung bei:~~

1. Vorstellung:

MA:

Blastrik: gain 14,9

coarse gain: 200 ~~00~~

Shaping time: 0.5 μs

Einstellen der Photodioden $\frac{1}{2} \cdot 90^\circ$

Zeileg des NaI: - 2,2 - 130 - 16

- 3,0 - 104 - 10

- 1,4 - 241 - 11

- 1,0 - 261 - 13

- 0,5 - 30 - 8

- 0,8 - 141 - 11

- 0,9 - 240 - 12

- 1,0 - 266 - 24

- 1,1 - 280 - 20

- 1,2 - 284 - 9

- 1,3 - 234 - 8

- 1,15 - 258 - 21

- 1,05 - 294 - 9

THK

Messung: $90^\circ - 270^\circ$, Zeit $t = 100s$

Grad	Braunsdorffsen	Nal	Blazitk
90°	142	30821	263273
90°	134	30633	262249
90°	138	31108	258825
100°	134	31290	255188
100°	137	30855	253006
100°	132	30294	253320
110°	126	30725	249995
110°	142	30854	248284
110°	131	31046	248089
120°	136	30968	245466
120°	150	30944	248147
120°	121	30532	248328
130°	136	30909	246692
130°	149	31348	246927
130°	133	30879	247145
140°	134	30579	247264
140°	155	30920	246426
140°	136	30892	246504
150°	161	30863	248752
150°	159	30883	250869
150°	141	30832	248542
155°	159	31743	248854
155°	145	31005	248497
155°	154	30671	251599
160°	156	30988	250204
160°	199	30843	251961
TuH	153	30894	252506

	Stoingjärvi	Nal	Elast
165°	166	30843	252873
165°	173	37073	252989
165°	189	30551	255729
170°	351	30483	255520
170°	282	30923	257593
170°	325	30863	255722
175°	2045	30884	254964
175°	2060	30956	260038
175°	1965	30662	259272
180°	2488	30430	258495
180°	2573	30365	253554
180°	2522	30524	259886
185°	1523	30363	261632
185°	1466	30804	261840
185°	1543	37282	263233
190°	146	31059	264755
190°	202	37074	264682
190°	132	30646	265702
195°	151	30840	266626
195°	185	30920	265937
195°	182	30643	265831
200°	160	30895	268403
200°	154	30834	268782
200°	169	37246	268445
210°	166	30703	268948
210°	147	31083	268276
210°	144	31066	268706

Tek

~~220°~~
~~210°~~
~~220°~~

230	747	37033	269752
230	747	37037	270774
230	729	30858	270368
250	749	30879	287424
250	774	30787	282477
250	747	30684	271169
290	734	30739	277387
290	719	30873	280404
290	737	30948	271504

"zufällige Blockzidensen:

Spann (100%)

abtag 64
(worker 7,7)

80, 85, 104

Tat

Abbildungsverzeichnis

1	Zerfallsschema von Cobald	60	4
2	stark vereinfachtes Zerfallsschema von Europium	152	5
3	Thorium-Reihe		5
4	Blockschaltbild1: Aufnahme der Spektren: NaI-Szinti:anorganischer Szintillator, PA:Pre Amplifier, MA:MAin Amplifier, MCA:Multi Channel Analyser		9
5	Blockschaltbild2: Messung der Koinzidenz, Gelber Kreis: ^{22}Na (mit 511 keV-Vernichtungsspeak), NaI-Szinti:anorganischer Szintillator, PM:Pre Amplifier, MA: MAin Amplifier, SCA: Single Channel Analyser, Gate: lineares Gate, MCA:Multi Channel Analyser, Plastik-Szinti: organischer Szintillator		10
6	Oszilloskopaufnahme: Signale des Main Amplifiers, Gelb:Eingangssignal, Violett: unipolares Ausgagssignal, Hellblau: bipolares Ausgangssignal		11
7	verschieden starke Verstärkung durch den Amplifier bei gleichem Eingangssignal		12
8	verschiedene Shaping Time des Amplifiers bei gleichem Eingangssignal		13
9	Grafik zur Energieeichung: Natrium		15
10	Grafik zur Energieeichung: Natrium-1274,6 Peak		15
11	Grafik zur Energieeichung: Cobalt		16
12	Grafik zur Energieeichung: Europium		17
13	Linearer Fit zur Energiekalibrierung		18
14	Blockschaltbild2: Messung der Koinzidenz, Gelber Kreis: ^{22}Na (mit 511 keV-Vernichtungsspeak), NaI-Szinti:anorganischer Szintillator, PM:Pre Amplifier, MA: MAin Amplifier, SCA: Single Channel Analyser, Gate: lineares Gate, MCA:Multi Channel Analyser, Plastik-Szinti: organischer Szintillator		19
15	Aufnahmen der Ausgänge des SCA		20
16	Ausgangssignal des linearen Gates		21
17	Das lineare Gate und der unipolare Puls		21
18	Output der Timing Unit		22
19	beide Signale aus der Timing Unit für die Koinzidenz Unit		23
20	Gaußfit der Winkelabhängigkeit der Paarvernichtungskoinzidenzmessung		23
21	Natriumspektrum, Screenshot		26
22	Cobaldspektrum, Screenshot		26
23	Thoriumspektrum, Screenshot		27
24	Untergrundmessung, Screenshot		27

Literatur

- [1] Th. Klapdor-Kleingrothaus, Szintillationszähler, Versuchsanleitung
Fortgeschrittenen-Praktikum, Universität Freiburg, Juli 2016
- [2] Demtröder, W., "Experimentalphysik 3". Springer, Auflage 4, 2010

- [3] Köhler, M.; Köhli, M., Kurze Halbwertszeiten, Versuchsanleitung Fortgeschrittenen-Praktikum, Universität Freiburg, April 2011
- [4] Kotyk, T., Versuche zur Radioaktivität im Physikalischen Fortgeschrittenen Praktikum an der Alber-Ludwigs-Universität, Universität Freiburg,
Bearbeitet am Physikalischen Institut, Abteilung Prof. Dr. Karl Jakobs, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau in der Zeit vom 16.05.2005 bis 16.11.2005