

Entwicklung und Test einer Datenaufnahme mit hoher Zählrate für einen Aktivierungsaufbau

- Bachelor-Arbeit -

von Clemens Beinrucker

Institut für Angewandte Physik
Experimentelle Astrophysik



4. Oktober 2011

Betreut durch
Prof. Dr. Rene Reifarth
und Dr. Kerstin Sonnabend

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	7
1.1	Einleitung	7
1.2	Zielsetzung der Arbeit	8
2	Aufbau und technische Grundlagen	9
2.1	Kernaufbau	12
2.2	HPGe-Detektor	13
2.3	Signalverarbeitung	17
2.3.1	Spectroscopy Amplifier	17
2.3.2	Zeitweig	18
2.3.3	Digitalisierung	21
2.3.4	Digitizer	21
2.3.5	Trigger und Trapezfilter	22
2.3.6	Multi-Channel-Analyser	24
2.4	Datenauswertung	24
3	Auswertung und Fazit	27
3.1	Auswertung	27
3.1.1	Energieauflösung	27
3.1.2	Totzeit	30
3.2	Fazit	33
	Referenzen	37
	Anhang	39

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kristalle eines Clover	8
2.1	Detektoraufbau	10
2.2	Schaltplan der analogen Elektronik	10
2.3	Verwendete analoge Module	11
2.4	Verwendeter Digitizer	11
2.5	Spektrum in gnuplot	12
2.6	Schema der Energieniveaus	13
2.7	Zerfallsschema ^{22}Na	14
2.8	Zerfallsschema ^{60}Co	14
2.9	Elektron-Loch-Paar	15
2.10	Germaniumdetektor-Signal	16
2.11	Schaltplan eines ladungssensitiven Vorverstärkers	16
2.12	Schaltplan eines $CR-(RC)^n$ -Shaper	17
2.13	Spec-Amp-Signal	18
2.14	TFA-Signal	19
2.15	CFD-Signal	19
2.16	Gate-Signal	20
2.17	Gate- und Energiesignal ohne Delay	20
2.18	Gate- und Energiesignal mit Delay	20
2.19	Funktionsweise Softwaretrigger	22
2.20	Funktionsweise Trapezfilter	23
3.1	Softwareparameter für Trigger und Trapezfilter	28
3.2	Spektrum in MPAWIN	28
3.3	Steigung der Kalibrationsgeraden der analogen Elektronik	29
3.4	Steigung der Kalibrationsgeraden der digitalen Elektronik	30
3.5	Abstand und FWHM	31
3.6	Kristall und FWHM	31
3.7	Energie und FWHM	32
3.8	Kalibrationsgerade des Digitizers bei der Messung mit beiden Quellen	32
3.9	Vergleich der Spektren der beiden Messungen zur Bestimmung der Totzeit	35

Tabellenverzeichnis

3.1	Messzeiten zur Bestimmung der Energieauflösung	29
3.2	Vergleich der Peakflächen mit analoger und digitaler Elektronik	33
A.1	Daten der DAQ mit analoger Elektronik	39
A.1	Daten der DAQ mit analoger Elektronik	40
A.1	Daten der DAQ mit analoger Elektronik	41
A.2	Daten der DAQ mit digitaler Elektronik	41
A.2	Daten der DAQ mit digitaler Elektronik	42
A.2	Daten der DAQ mit digitaler Elektronik	43

1 Einleitung und Motivation

1.1 Einleitung

In der Sonne und anderen Sternen werden die meisten Elemente in den verschiedenen Stufen der stellaren Entwicklung produziert. Die Untersuchung der Nukleosyntheseprozesse führt zu einem tiefen Einblick und Verständnis der im Sterninneren ablaufenden Reaktionen.

Im Labor können einzelne Reaktionen vermessen werden. Ziel ist die Ermittlung der Reaktionswahrscheinlichkeiten, die als Wirkungsquerschnitte angegeben werden.

Durch die hohen Temperaturen in den Sternen haben die Teilchen eine hohe kinetische Energie. Diese wird in einem Labor durch den Einsatz von Beschleunigern erreicht. In der zu untersuchenden Reaktion wird ein Teilchen beschleunigt und das Andere in Form einer Probe beschossen. Der Nachweis der Reaktion erfolgt durch die Detektion ausgesendeter Teilchen.

In vielen dieser Reaktionen entsteht ein Kern in einem angeregten Energieniveau, der durch Emission eines Photons mit diskreter Energie zurück in den Grundzustand übergeht. Zum Nachweis der Photonen werden hochreine Germaniumdetektoren (HPGe, **H**igh **P**urity **G**ermanium) verwendet, die eine hohe Energieauflösung haben. Der Nachweis erfolgt hierbei durch die Anregung vieler Elektronen über die im Halbleiter vorhandene Bandlücke, wobei anschließend ein Signal in Form einer Spannungskurve ausgegeben wird.

Diese Spannungskurve wird anschließend von einer Datenverarbeitung/-aufnahme (DAQ, **d**ata **a**cquisition) in ein Energiehistogramm umgewandelt. Es kommt analoge oder digitale Elektronik zum Einsatz, um die gewünschten Informationen von Energie, Zeitpunkt und Anzahl einer gewissen Energie zu bestimmen. Mittels Computersoftware werden die Spektren dargestellt und die Eigenschaften der sichtbaren Peaks bestimmt.

Insbesondere sind dabei zwei Probleme zu beachten:

1. Neben den Photonen der zu untersuchenden Reaktionen treten auch Photonen aus anderen Quellen in den Detektor ein und werden verarbeitet. Diese sind in Form eines Untergrundes im Energiehistogramm zu erkennen.
2. Bei hohen Raten muss der Detektor viele Photonen nachweisen und die DAQ muss diese in Form von Signalen verarbeiten. Dies kann das Messergebnis verfälschen, da sich mehrere Signale überlagern können und die Verarbeitung eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt. In dieser Totzeit werden weitere Signale vom Detektor verworfen und gehen verloren.

Um den Untergrund zu verringern, wird in einem Aktivierungsexperiment die Probe nach der Bestrahlung im Beschleuniger mit Hilfe eines separat aufgebauten Detektors vermessen. Bei der Aktivierung finden durch die Bestrahlung mit dem Reaktionspartner der erste Schritt der gewünschten Reaktion statt. Der resultierende Kern befindet sich in einem angeregten Zustand, der mit einer spezifischen Halbwertszeit $\tau_{1/2}$ zerfällt. Durch diesen Zerfall findet die zweite Hälfte der gewünschten Reaktion statt, wobei das ausgesandte Teilchen gemessen wird. Durch die Trennung von Aktivierung und Messung ist es möglich, den Untergrund zu minimieren und genau zu kennen.

Eine spezielle Bauart eines HPGe-Detektors ist ein sogenannter Clover-Detektor. Dieser hat vier kleine Kristalle neben- und übereinander angeordnet zur Detektion, statt eines großen Kristalls. (siehe Seite 8, Abb. 1.1) Dies verringert die Anzahl an Photonen, die pro individuellem Kristall nachgewiesen werden. Zusätzlich findet die DAQ für jeden Kristall einzeln statt, sodass die Totzeit der Module verkleinert wird. Insbesondere bei hohen Raten ist dies von Vorteil, da die Photonen zuverlässig detektiert und verarbeitet werden. Zwar gibt es auch bei einem Clover-Detektor eine

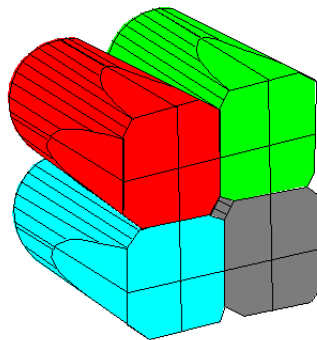


Abbildung 1.1: Blick auf die abgeflachte Seite der vier Kristalle eines Clover-Detektors. Diese werden zur Unterscheidung mit den Farben Rot, Grün, Blau und Schwarz bezeichnet. [1]

Schwelle, wann die Rate zu hoch ist, aber diese ist im Vergleich zu einem HPGe-Detektor mit einem großen Kristall höher.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Für Ende Oktober ist an der Goethe Universität Frankfurt ein Aktivierungsexperiment mit ^{60}Fe durch Neutronen geplant, um die Reaktion $^{60}\text{Fe}(n,\gamma)$ zu messen. Die aktivierte Probe wird eine hohe Aktivität haben und damit für eine hohe Zählrate im Germaniumdetektor sorgen. Zur Messung ist ein System aus zwei Clover-Detektoren geplant, die von gegenüberliegenden Seiten nah an die Probe gestellt werden. So soll eine Abdeckung des Raumwinkels der Messung von nahezu 4π erreicht werden. [2] [3]

Entscheidend für die Durchführung des Experimentes ist dabei die Kenntnis der Eigenschaften der Ausleseelektronik. Durch sie ist es möglich, im erhaltenen Spektrum die Kanäle in eine Energie umzurechnen, Aussagen über die Qualität der Messung treffen zu können und die ermittelten Werte vergleichen zu können. Dazu muss eine bekannte Probe gemessen und das Ergebnis analysiert werden, um später anhand eines Ergebnisses auf die Probe rückschließen zu können.

Da bei diesem Aufbau auch mit einer hohen Totzeit bei einer DAQ mit analoger Elektronik zu rechnen ist, soll ein Digitizer von CAEN zum Einsatz kommen. Von diesem wird erwartet, dass er auf Grund der Verwendung schneller Flash-ADCs im Idealfall ohne Totzeit arbeitet. Durch eine hohe Abtastrate und eine Digitalisierung mit vielen Vergleichswerten über den Akzeptanzbereich soll gleichzeitig eine gute Energieauflösung erreicht werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Eigenschaften der digitalen Elektronik für die Datenauswertung eines der beiden Clover-Detektoren zu bestimmen, insbesondere die Energieauflösung und die Totzeit.

Zur Bestimmung der Energieauflösung wurde jeweils eine Messreihe mit einer ^{22}Na - und einer ^{60}Co -Kalibrationsquelle gemacht. Diese haben jeweils zwei in einem Spektrum gut erkennbare Peaks bei 511 keV und 1275 keV [4] bzw. 1172 keV und 1332 keV [5]. Es wurden die Position der Peaks und nach der Berechnung einer Kalibrationsgeraden die Halbwertsbreiten bestimmt.

Zur Bestimmung der Totzeit wurden zwei Messungen mit beiden Quellen zusammen durchgeführt. Dabei wurde die ^{60}Co -Quelle bei beiden Messungen im gleichen Abstand vor dem Detektor postiert. Die Position der ^{22}Na -Quelle wurde verändert, um bei einer Messung eine hohe Rate zu erhalten. Aus dem Flächenverhältnis der Einzelpeaks der ^{60}Co -Quelle mit gleicher Energie wurde die Totzeit bestimmt.

Zum Vergleich wurde eine DAQ mit analoger Elektronik aufgebaut und jeweils die Messungen wiederholt.

2 Aufbau und technische Grundlagen

Zur Messung wurde ein Clover Detektor der Firma Eurisys Measures/Canberra verwendet, der koaxial mit einer Hochspannung von +3000 V aus einer Hochspannungsversorgung vom Typ 3106B von Canberra betrieben wurde. Zur Kühlung wurde ein automatisches Füllsystem für flüssigen Stickstoff angeschlossen, damit der Detektor die gewünschte Temperatur auch über die Haltedauer des angebrachten Stickstofftanks halten konnte. Zur Abschirmung gegen kosmische Hintergrundstrahlung wurde eine einlagige Bleiabschirmung von 5 cm Dicke aufgebaut, sowie vier Bismut-Germanium-Oxid-Detektoren (BGO) direkt um die Kristalle, die aber statt der ursprünglich geplanten aktiven Abschirmung mit Veto-Signal nur als passive Abschirmung verwendet wurden. Montiert war der Detektor auf ein Schienensystem, damit für später geplante Messungen der Abstand zur Probe leicht variiert werden konnte (siehe Seite 10, Abb. 2.1).

Da einer der vier eingebauten ladungssensitiven Vorverstärker vom Typ Eurisys Measures PSC 921 nicht mehr gut funktionierte, wurde er durch einen der Bauart ähnlichen vom Typ Canberra PSC 822 ersetzt. Dies machte sich in den nachfolgenden Einstellungen der Elektronik und der späteren Energiekalibrierung bemerkbar durch eine größere Verstärkung und einer größeren Steuerung der ermittelten Werte.

Bei der analogen Elektronik sind die einzelnen Verarbeitungsschritte auf verschiedene Module aufgeteilt, weshalb zur Ermittlung einer Zeitinformation andere Module nötig sind, als zur Ermittlung einer Energieinformation. Im Schaltdiagramm ist daher die Verarbeitung in einen Energiezweig und einen Zeitzweig sichtbar. (siehe Seite 10, Abb. 2.2)

Die Cloversignale wurden in den rückseitigen Eingang von vier Ortec Spectroscopy Amplifier 672 angeschlossen, sodass das Signal einmal verarbeitet wurde und einmal im vorderen Eingang unverändert herausgegeben wurde. So konnte auch der Zeitzweig bestehend aus einem Ortec Quad TFA 863, einem Ortec Quad CFD 934, zwei LeCroy Dual Gate Generator 222 und einem Phillips Scientific Quad Gate/Delay Generator 794 mit Signalen versorgt werden (siehe Seite 11, Abb. 2.3). Dazu kamen wie in den späteren Messungen eine ^{22}Na - und eine ^{60}Co -Quelle zum Einsatz.

Anschließend wurden die Signale von vier Canberra ADC 8715 digitalisiert und zur Auswertung am Computer mit MPWIN aufgenommen. Die Verstärkung und die maximale Kanalzahl des ADC wurden auf 8192 Kanäle eingestellt. Da sehr viel Rauschen in den untersten Kanälen angezeigt wurde, wurde die untere Akzeptanzschranke des ADC erhöht, sodass die ersten 30-50 Kanäle ohne Signale blieben. Dadurch wurde die Totzeit im ADC verringert und die Peaks von Interesse waren besser sichtbar.

Beim Benutzung der digitalen Elektronik konnte der Detektor direkt an den Digitizer angeschlossen werden. Die Signale des Vorverstärkers deckten jedoch nur einen kleinen Bereich des Akzeptanzbereichs des Digitizers ab, sodass ein großer Teil des Spektrums leer blieb. Um die Spannung daran anzupassen, wurde zwischen Detektor und Digitizer ein Ortec Quad TFA 863 verwendet. Damit war die Verstärkung einstellbar und die Zeitkonstante für den Differentiator wurde groß und für den Integrator klein gewählt, sodass sie die Signalform wenig veränderten. Als Digitizer wurde von CAEN ein Modul V1724 8 Channel 14 Bit 100 MegaSample/Sec Digitizer verwendet, der die Signale über ein Modul V2718 Conet VME-Bridge an einen Computer übermittelte (siehe Seite 11, Abb. 2.4). Die Daten wurden von einem DPP-Runner Demo-Programm (**D**igital **P**ulse **P**rocessing) von CAEN ausgelesen und das Energiespektrum wurde mit Hilfe von gnuplot auf 16384 Kanälen angezeigt (siehe Seite 12, Abb. 2.5). Mit gnuplot konnten die Peaks vergrößert werden und nach Definition einer Gaußkurve und einer groben Angabe der Parameter durch Ablesen war ein Fit durch gnuplot möglich. Dieser wurde zur Kontrolle zusammen mit dem Peak aufgetragen.

Im folgenden Abschnitt wird die Funktionsweise der einzelnen Module erläutert, sowie ein

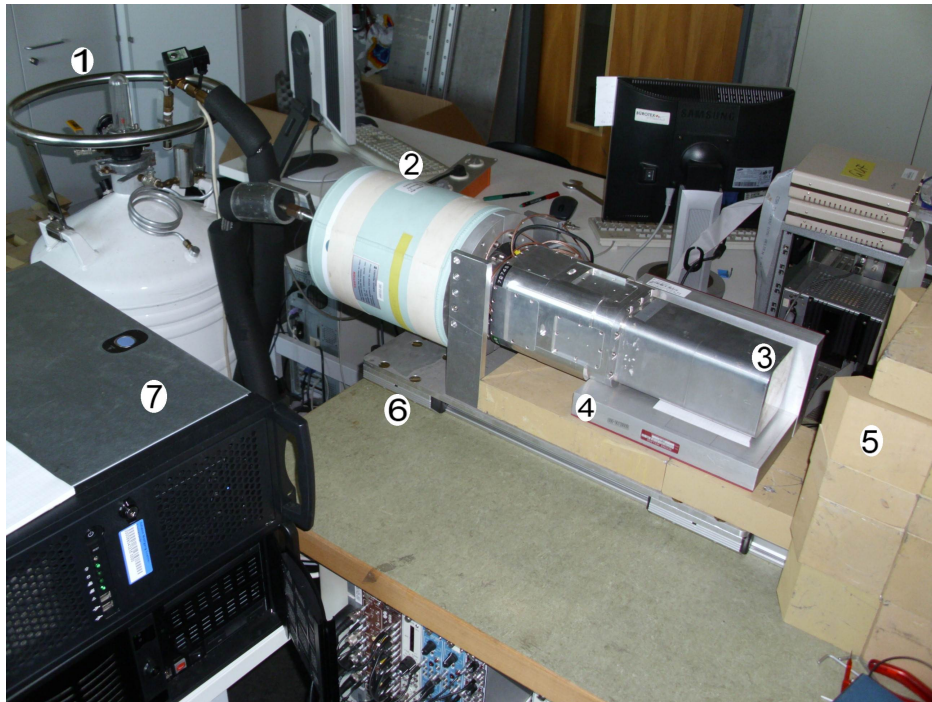


Abbildung 2.1: Der Detektoraufbau. 1: Kanne mit flüssigem Stickstoff zur Kühlung; 2: Stickstoffbehälter des Detektors; 3: Germaniumkristalle; 4: BGOs als passive Abschirmung; 5: Bleiabschirmung gegen kosmische Hintergrundstrahlung; 6: Schienensystem; 7: Computer zur Datenauswertung

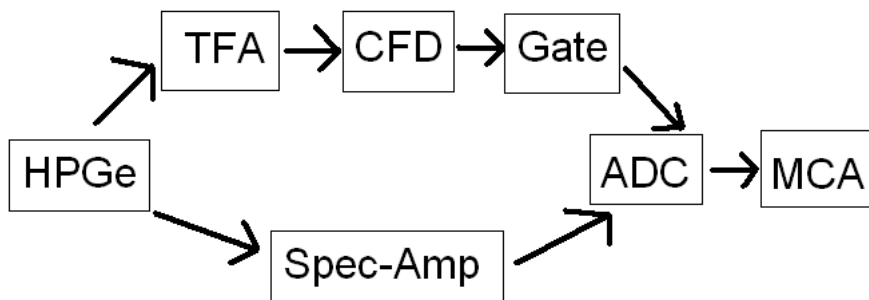


Abbildung 2.2: Schaltplan der analogen Elektronik. Für einen Clover-Detektor kommen die jeweiligen Module in vierfacher Ausführung vor. Die einzelnen Module sind im Abschnitt 2.3 erläutert. Bei einer digitalen Elektronik übernimmt der Digitizer die komplette Verarbeitung nach dem HPGe-Detektor.

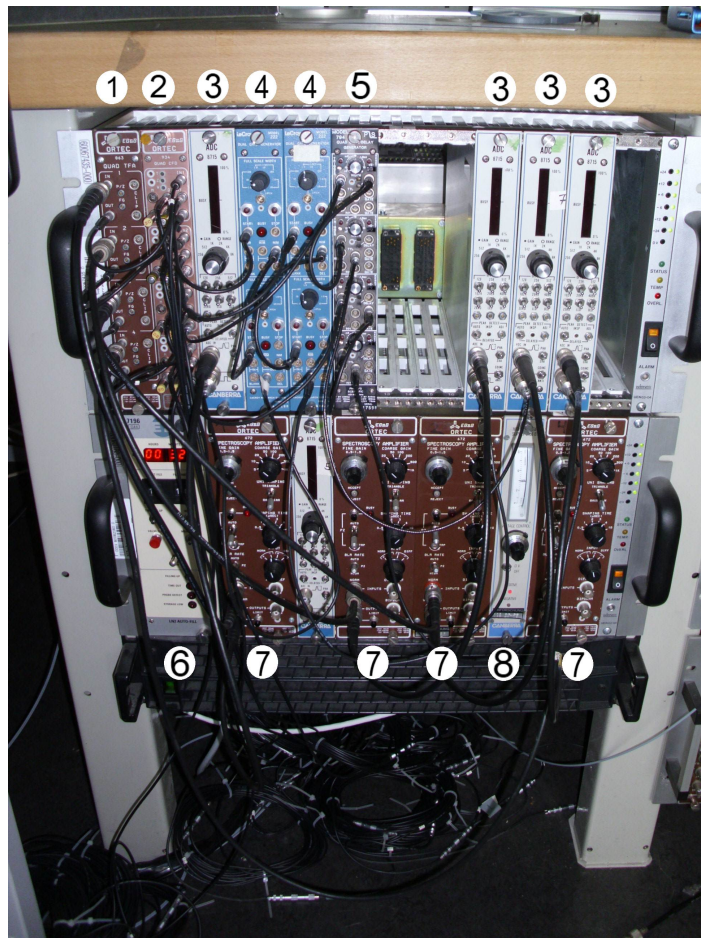


Abbildung 2.3: Die verwendeten Module der analogen Elektronik. 1: Quad TFA; 2: Quad CFD; 3: ADCs; 4: Dual Gate-Generator; 5: Quad Gate-Generator; 6: Steuerung der automatischen Stickstoffbefüllung; 7: Spec-Amp; 8: Hochspannungsversorgung; am Boden liegend: Kabel zur Signalverzögerung für CFD

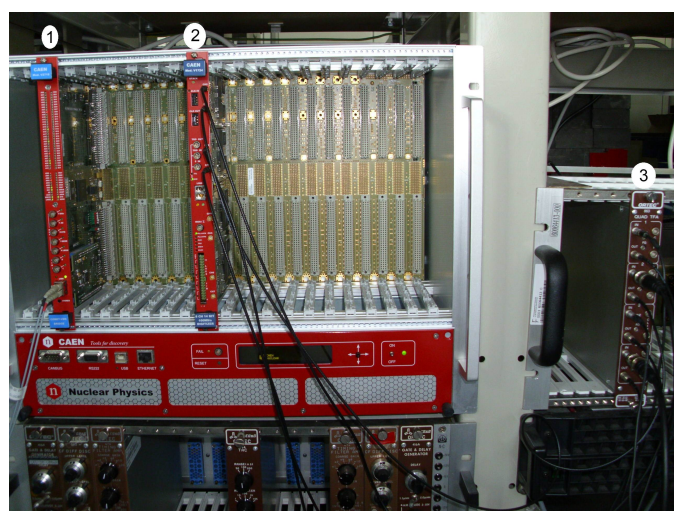


Abbildung 2.4: Das VME Crate von CAEN liefert für die eingesteckten Module Strom und ermöglicht die Kommunikation zwischen den eingesteckten Modulen. 1: CONET Bridge zur Verbindung der Module mit einem Computer, 2: Der verwendete Digitizer der Firma CAEN, 3: TFA zur Verstärkung der Signale

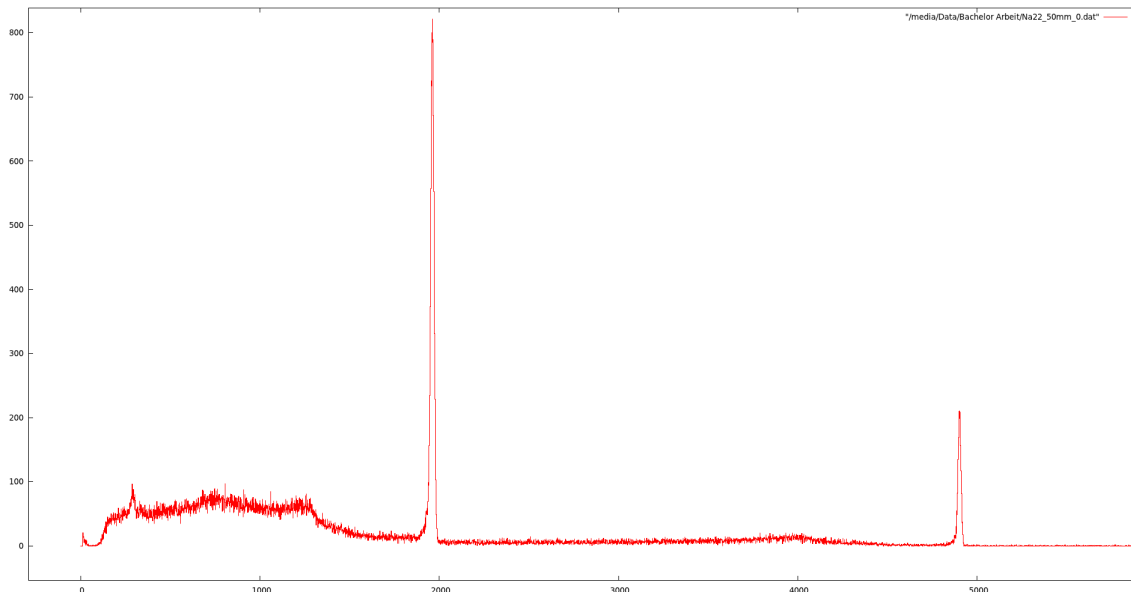


Abbildung 2.5: Mit dem Digitizer aufgenommenes Spektrum in GnuPlot. Der vordere Bereich wurde vergrößert, da ab Kanal 6000 nur wenige oder keine Counts mehr vorhanden waren. Die zwei Peaks der ^{22}Na -Quelle sind deutlich zu sehen.

einfaches Modell für den Aufbau eines Atomkernes vorgestellt, das die diskreten Energien der Photonen der verwendeten Kalibrationsquellen plausibel macht. Dabei sind insbesondere die technischen Details zur Elektronik der Quelle [6] entnommen.

2.1 Kernaufbau

Das einfachste Modell für das Potential der starken Kernkraft mit seiner kurzen Reichweite ist ein Kastenpotential. Die Schrödingergleichung unter Berücksichtigung der Stetigkeit der Wellenfunktion an den Rändern des Potential liefert diskrete Lösungen, denen eine feste Energie zugewiesen werden kann. Diese Energien werden Energieniveaus genannt, die von den Protonen und Neutronen wegen des Pauli-Prinzip jeweils mit Spin Up und Spin Down besetzt werden können. Dadurch müssen auch höher gelegene Energieniveaus besetzt werden, falls eine entsprechende Anzahl an Protonen oder Neutronen im Kern vorhanden ist. Die Niveaus liegen dabei aber für Protonen höher als für Neutronen, da sich Erstere auf Grund ihrer positiven Ladungen gegenseitig abstoßen. (siehe Seite 13, Abb. 2.6)

Experimentelle Befunde haben eine Modifikation dieses Modells nötig gemacht, da besonders stabile Kerne mit einer gewissen Anzahl an Protonen und/oder Neutronen gefunden wurden. Durch Berücksichtigung einer Spin-Bahn-Kopplung in einem Wood-Saxxon-Potential, das einen „weicheren“ Rand als das Kastenpotential hat, konnte das erweiterte Modell dieses erklären.

Besetzt ein Nukleon ein Energieniveau und darunter liegende Niveaus sind noch frei, kann es in das unbesetzte Niveau wechseln. Dies ist unter anderem möglich, wenn ein weiteres Proton oder Neutron eingefangen wird, oder durch einen β -Zerfall das umgewandelte Proton oder Neutron ein neues Energieniveau besetzen muss. Der dabei entstandene angeregte Kern kann die überschüssige Energie von einigen MeV in Form eines oder mehrerer Photonen abgeben. Die ausgesandten Photonen können auf Grund ihrer diskreten Energie wie bei Elektronenübergängen in der Atomhülle zur Identifikation des Kerns oder bei Kenntnis des Kerns die Information über die ausgesandten Photonen, z.B. für eine Kalibrationsquelle, genutzt werden. (siehe Seite 14, Abb. 2.7) und (siehe

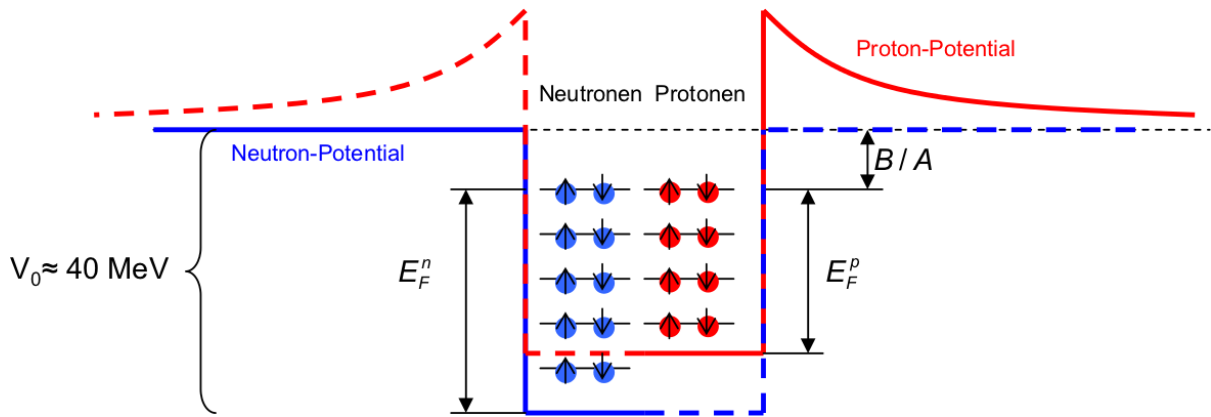


Abbildung 2.6: Schema der Energieniveaus eines Kerns. V_0 ist die Tiefe des Potentialtopfes in guter Übereinstimmung mit experimentellen Befunden. Die Spins sind mit Pfeilen angedeutet und E_F ist die Fermienergie. Die Größe $\frac{B}{A}$ gibt die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon an und ist etwa 7 – 8 MeV. Blau: Neutronen, Rot: Protonen [7]

Seite 14, Abb. 2.8)

2.2 HPGe-Detektor

Germanium als Halbleiter hat eine Bandlücke von 0,75 eV bei 0 K und 0,67 eV bei 300 K zwischen dem Valenz- und Leitungsband. In dieser Lücke haben Elektronen durch die Kristallstruktur des Germanium keine freien Zustände, die sie besetzen können. Die Lücke kann aber durch thermische Anregung der Elektronen überwunden werden. Diese Elektronen machen sich bei angelegter Hochspannung in Form eines Leckstroms und Rauschen des Signals bemerkbar. In einem Isolator ist die Bandlücke dafür zu groß und in einem Leiter überlappen die beiden Bänder.

Für die Wahrscheinlichkeit, durch thermische Anregung ein Elektron-Loch-Paar zu bilden, gilt:

$$W(T) = CT^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (2.1)$$

mit: C - Materialkonstante, T - Temperatur,

E_g - Energielücke, k_B - Boltzmannkonstante

Alternativ kann ein Elektron diese Bandlücke überwinden, falls es durch den Photoeffekt oder durch Compton-Streuung Energie eines Photons aufnimmt. Es ist dann im Leitungsband frei beweglich, während gleichzeitig die frühere Position des Elektron als positives „Loch“ zurück bleibt. (siehe Seite 15, Abb. 2.9)

Dies wird zur Detektion von Photonen genutzt. Durch das Anlegen einer Hochspannung von wenigen kV an den Kristall werden die im Leitungsband vorhandenen Elektronen zur positiven Anode beschleunigt. Die Löcher werden durch ebenfalls zur Anode gezogenen Elektronen immer wieder besetzt und wandern somit effektiv zur Kathode. Dadurch findet eine Ladungstrennung statt, die durch den nun fließenden Strom oder die verkleinerte Spannung gemessen und für Rückschlüsse auf die ursprünglich vom Photon abgegebene Energie genutzt werden kann. Je größer die Energie des zu messenden Photons ist, desto mehr kinetische Energie behält das angeregte Elektron. Diese Energie gibt es durch Stöße an weiter Elektronen ab, die ihrerseits in das Valenzband angeregt werden. Es werden mehr Elektron-Loch-Paare gebildet und die gemessene Ladung bzw. die Spannungsdifferenz zur angelegten Spannung wird größer. Die deponierte Energie ist direkt proportional zur Amplitude des nachfolgenden Signals.

Für eine möglichst hohen Spannung bei möglichst kleinen Leckströmen gibt es zwei Gründe. Zum Einen soll die Trennung von Elektronen und Löchern möglichst im ganzen vorhandenen De-

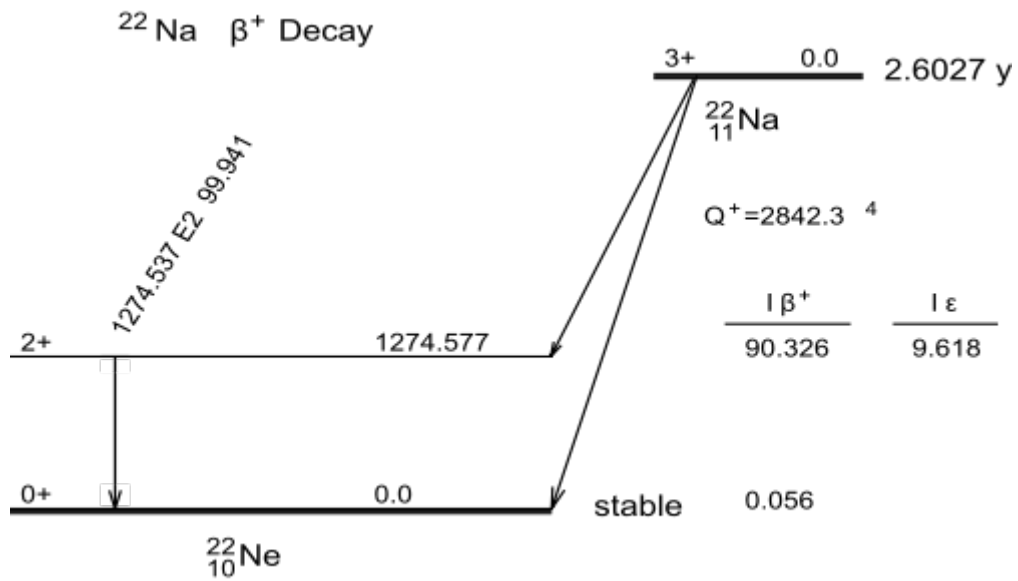


Abbildung 2.7: Die Halbwertszeit des Nuklids ist rechts neben dem Grundzustand von ^{22}Na angegeben. Die Beschriftung des Pfeiles an der linken Seite gibt die Energie in keV des ausgesandten Photons bei diesem Übergang an, die Art des elektromagnetischen Übergangs und die Wahrscheinlichkeit für dessen Eintreten. [4]

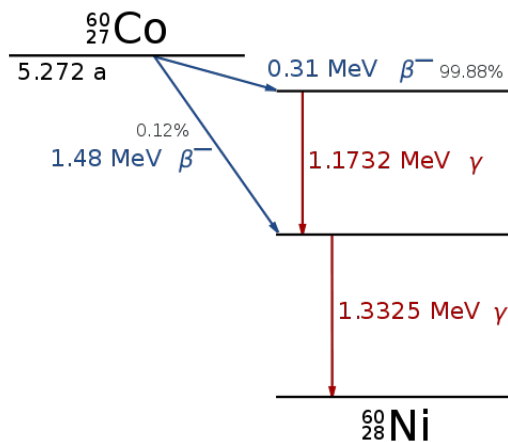


Abbildung 2.8: Die schwarze Zahl gibt die Halbwertszeit des Nuklid an. Die schwarzen vertikalen Schritte deuten die verschiedenen Energieniveaus an. Die Prozentangabe gibt die Wahrscheinlichkeit dieses Zerfalls an. Die roten Zahlen geben die Unterschiede in den Energieniveaus an. Bei einem Übergang wird diese Energie in Form eines Photons abgegeben. [5]

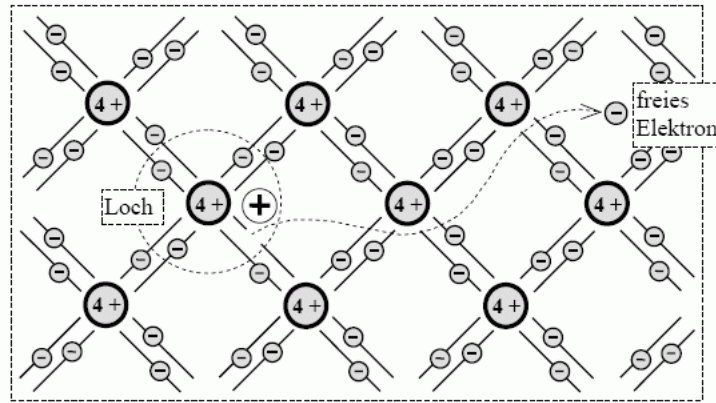


Abbildung 2.9: Ein Elektron wird angeregt und verlässt seine Position im Ionengitter. Zurück bleibt eine Leerstelle als positives "Loch". Dick umrandet sind die Atome. [8]

tektorvolumen geschehen, damit das aktive Volumen möglichst groß ist. Zum Anderen müssen die Elektronen und Löcher zum Nachweis zu den Elektroden gelangen. Dabei erreichen sie durch das beschleunigende elektrische Feld und durch abbremsende Stöße eine maximale Geschwindigkeit, die sogenannte Driftgeschwindigkeit. Die Zeit zur Durchquerung des Kristalls bestimmt dabei die Anstiegsflanke des ausgegebenen Signals. Die maximale Geschwindigkeit soll deshalb möglichst schnell erreicht werden. Die Driftgeschwindigkeit der Löcher ist durch die indirekte Bewegung meist kleiner als die der Elektronen. Als Stärke des elektischen Feldes hat sich ca. $3 \cdot 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ [6] im gesamten Volumen als sinnvoll erwiesen.

Das Anlegen der Hochspannung kann auf zwei Arten erfolgen: planar und koaxial.

1. Im planaren Fall wird an einer Außenseite des Kristalls die eine Elektrode und auf der gegenüberliegenden Seite die andere Elektrode angelegt. Das elektrische Feld im Kristall ist somit homogen und gleich ausgerichtet. Nachteil dieser Konfiguration ist jedoch die Beschränkung der Größe des Kristalls. Für einen größeren Kristall ist eine größere Hochspannung erforderlich, die jedoch für einen Leckstrom sorgt. Dadurch muss eine Verkleinerung des aktiven Detektorvolumens oder eine schlechtere Energieauflösung in Kauf genommen werden.
2. Im koaxialen Fall liegt eine Elektrode in der Mitte des Kristalls und die andere an der Außenseite, sodass in dieser zylinderförmigen Geometrie das elektrische Feld radial verläuft. Die maximal anlegbare Spannung beschränkt zwar den Radius des Kristalls, aber in axialer Richtung (Länge des Zylinders) kann das aktive Volumen vergrößert werden.

Die Signale des Detektors sind nur einige mV groß und können durch Rauschen im Kabel überlagert werden. Ein nah am Detektor angebrachter Vorverstärker vergrößert die Spannung der Signale. (siehe Seite 16, Abb. 2.10) Dadurch wird der Einfluss des Rauschens auf den kurzen Abschnitt zwischen Kristall und Vorverstärker beschränkt. Im Vergleich mit einem Signal ohne Vorverstärker kann somit in der nachfolgenden Verarbeitung besser zwischen Rauschen und Signal unterschieden werden. Dies verbessert die Energieauflösung und die im Detektor deponierten Energien werden genauer in die entsprechenden Kanäle eingeordnet. In der Bauart wird zwischen spannungs-, strom- und ladungssensitiv unterschieden, wobei Letzere häufig im Einsatz sind.

Der in diesem Aufbau verwendete ladungssensitive Vorverstärker besteht aus einer Triode mit einer dazu parallel geschalteten Kapazität und Widerstand. (siehe Seite 16, Abb. 2.11) Durch Erdung des einen Eingangs der Triode wird der andere Eingang virtuell geerdet. Somit gilt für den Knotenpunkt vor der Triode und für den Kondensator:

$$q_{in} = -q_f \text{ und } U_{out} = -\frac{q_f}{C_f}$$

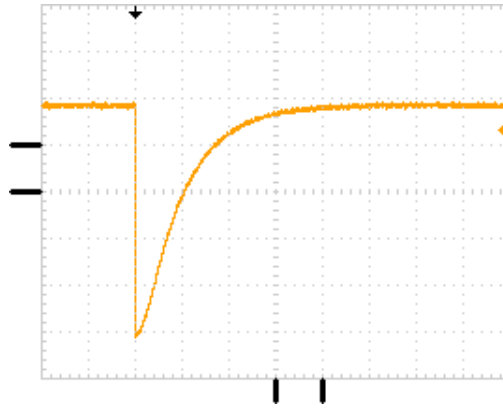


Abbildung 2.10: Ein typisches Signal eines Germaniumdetektors nach dem Vorverstärker mit einer steilen Anstiegsflanke und einem exponentiellen Abfall. Es wird eine Signalhöhe von ca. 1 V erreicht und nach ca. 200 μs ist das Signal abgeklungen. Achsenbeschriftung: x-Achse 50 μs ; y-Achse 200 mV

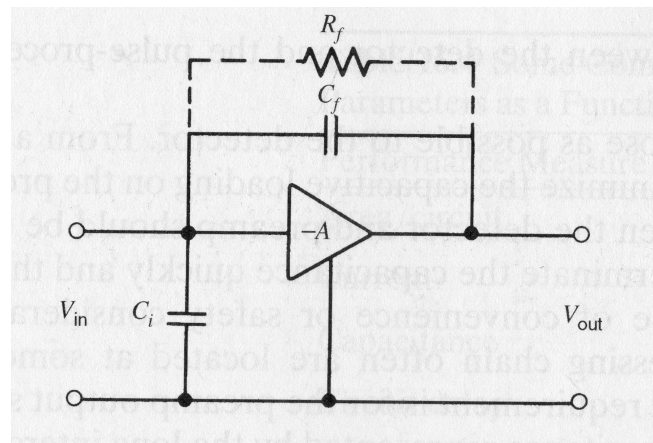


Abbildung 2.11: Schaltplan eines ladungssensitiven Vorverstärkers. [6]

In Abhängigkeit von C_f wird die Ladung in eine dazu proportionale Spannung umgewandelt. Die Form des verstärkten Signals hängt im Idealfall nur von der Zeit für das Aufsammeln der Ladung ab und ergibt eine steile Anstiegsflanke. Die Entladung des Kondensators sorgt für einen exponentiellen Abfall, der von der Zeitkonstante $\tau = C_f \cdot R_f$ abhängt.

Bei einem Clover-Detektor werden vier kleinere Kristalle zu einer quadratischen Grundfläche neben- bzw. übereinander gelegt. (siehe Seite 8, Abb. 1.1) Neben den geringeren Herstellungskosten von vier kleineren Kristallen gegenüber einem großen hat dieser Aufbau noch weitere Vorteile. Die Elektronen oder Löcher müssen maximal den halben Radius durchqueren, um zu einer Elektrode zu kommen und somit die Messung zu ermöglichen. Dadurch wird die Anstiegsflanke steiler. Des Weiteren wird eine Überlagerung zweier Signale verringert, da die vier Kristalle unabhängig von einander die einkommenden Photonen messen. Ein Nachteil ist aber, dass die abgegebene Energie im Detektor sich auf zwei Kristalle aufteilen kann und somit beide nur einen Teil der Energie messen. Deshalb kann ohne Beachtung der Zeitinformation die Peakfläche der Energien von Interesse und damit Rate und Wirkungsquerschnitt der Reaktion als zu niedrig bestimmt werden. Dennoch eignet sich ein Clover-Detektor aus oben genannten Vorteilen besser für Messungen mit hoher Rate. Die Verarbeitung der Zeitinformation in der Datenauswertung ist in der Praxis leichter, als die Nachteile eines nicht so gut geeigneten Detektors auszugleichen.

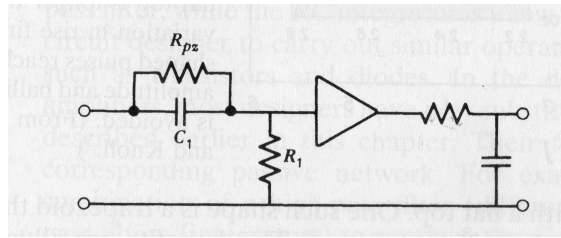


Abbildung 2.12: Schaltplan eines $CR-(RC)^n$ -Shaper mit pole-zero cancellation. R_{pz} ist der manuell einstellbare Widerstand, der das Signal möglichst schnell zurück auf die Nulllinie bringen soll. Links von Verstärker (Dreieck) ist der Differentiator, rechts davon der Integrator. [6]

2.3 Signalverarbeitung

Die Signale des Detektors sind schlecht dafür geeignet, die nötigen Informationen über Energie und Zeitpunkt eines eingetroffenen Photons, sowie die Anzahl in einem Zeitraum, zu bestimmen. Deshalb ist es nötig, die Signale so zu verarbeiten, dass diese gut von analoger oder digitaler Elektronik ausgelesen werden können. Die Verarbeitung erfolgt dabei bei der analogen Elektronik in mehreren Schritten und zwei Verarbeitungswegen durch verschiedene Module. Der Digitizer erledigt dies zusammen in einem Modul. Im Folgenden sind die jeweiligen Module näher erläutert.

2.3.1 Spectroscopy Amplifier

Die Signale des Vorverstärkers mit einer steilen Anstiegsflanke und einem langen exponentiellen Abfall haben zwei Nachteile bei der weiteren Verarbeitung: Durch den langen Abfall kann es zum sogenannten pile-up kommen, wenn ein zweites Signal während des ersten Abfalls eintrifft und sich beide überlagern. Außerdem ist die Spannung nur für einen vergleichsweise kurzen Zeitraum im Bereich ihres maximalen Wertes. Vorteilhafter ist ein gaußförmiger Puls, der schneller wieder auf die Baseline geht und symmetrisch um die Amplitude ist. Diese Aufgabe übernimmt ein **Spectroscopy Amplifier** (Spec-Amp). Die gewünschte Form wird durch die Kombination eines Hochpass-Filters (Differentiator) mit anschließend mehreren Tiefpass-Filtern (Integrator) erreicht, die auch $CR-(RC)^n$ -Shaper genannt wird (siehe Seite 17, Abb. 2.12). Formell sind unendlich viele RC -Shaper gemäß Formel 2.2 nötig, um ein gaußförmiges Signal zu erhalten. Jede weitere Verarbeitung dauert aber eine gewisse Zeit, sodass meist $n = 4$ als Mittelweg zwischen schneller Verarbeitung und guter Signalform verwendet wird (siehe Seite 18, Abb. 2.13). Die Zeitkonstante τ für Integration und Differentiation ist prinzipiell separat von einander einstellbar, es wird aber meist der gleiche Wert verwendet. Für einen HPGe-Detektor liefert $\tau = 6$ ms gute Ergebnisse. [6] Zu kleine Werte können den exponentiellen Abfall abschneiden und so den integrierten Wert für die Energie verfälschen, zu große Werte erhöhen die Chance von pile-up im Spec-Amp.

$$E_{out} = \frac{E}{n!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^n \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.2)$$

mit: $\tau = \tau_1 - \tau_2$; τ_1 : Zeitkonstante der CR -Schaltung
und τ_2 : Zeitkonstante der RC -Schaltung

Um die Effekte von pile-up zu verringern, wird eine sogenannte pile-up-rejection genutzt. Eine Möglichkeit dafür ist die Aufteilung des Signals in einen schnellen und einen langsamen Verarbeitungsweg. Der langsame Weg vollzieht die oben beschriebene Bearbeitung des Pulses und der schnelle Weg erfasst nur den Beginn eines Pulses. Wird während der langsamen Bearbeitungszeit

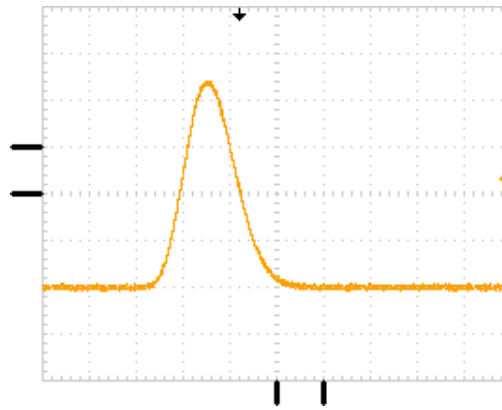


Abbildung 2.13: Ein gaußförmiges Signal eines Spectroscopy Amplifier. Es erreicht eine Höhe von ca. 4,4 V und dauert ca. 28 μs , wobei die rechte Flanke etwas langsamer abfällt, als die linke Flanke ansteigt. Achsenbeschriftung: x-Achse 10 μs ; y-Achse 1 V

des ersten Signals ein zweites im schnellen Weg registriert, werden das gerade verarbeitete und das neu ankommende Signal verworfen.

Da das Signal aus dem Vorverstärker eine endliche Abfalldauer hatte, ist das verarbeitete Signal meist nicht ideal gaußförmig. Es tritt ein sogenannter over- oder under-shoot auf, d.h. das Signal geht nicht direkt auf die Nulllinie zurück, sondern bleibt für eine längere Zeit ober- oder unterhalb dieser in Abhängigkeit der Zeitkonstante des Vorverstärkers. Durch Einfügen eines verstellbaren Widerstandes parallel zum ersten Kondensator im *CR*-Teil (siehe Seite 17, Abb. 2.12), lässt sich dieses Problem manuell beheben. Diese sogenannte pole-zero-cancellation erfolgt durch die visuelle Anpassung des Ausgangssignals an die für den Beobachter am Besten erscheinende Peakform. Weiterhin ist eine Verstärkung einstellbar, die an die Anforderungen der nachfolgenden Module angepasst wird. Insbesondere der ADC hat meist eine feste obere und untere Spannungsgrenze, zwischen denen die einkommenden Signale sein müssen. Dabei sollten die Energien von Interesse möglichst mittig in diesem Bereich sein, um eventuelle Ungenauigkeiten an den Grenzen für die Messung zu vermeiden und der gegebene Bereich möglichst gut ausgenutzt wird.

2.3.2 Zeitweig

Neben den Informationen über die Energie, die im Detektor gemessen wird, ist meist noch der Zeitpunkt der Messung von Interesse, um mögliche zeitliche Koinzidenzen bestimmen zu können. Die Signale aus dem Vorverstärker sind dafür schlecht geeignet und die Signale aus dem Spec-Amp werden durch die Verarbeitung unterschiedlich stark verzögert. Die Verarbeitung der Zeitinformation erfolgt deshalb separat in einem Zeitweig. Dafür haben Clover-Detektoren üblicherweise je zwei Signalkabel mit jeweils den gleichen Signalen aus dem Vorverstärker pro Kristall.

Beim **Timing Filter Amplifier (TFA)** sind die Zeitkonstanten für Differentiation und Integration einstellbar und deutlich kürzer als beim Spec-Amp. Dadurch hat der Peak nach einer kurzen Verarbeitungszeit eine steile Anstiegsflanke und ist vergleichsweise schmal (siehe Seite 19, Abb. 2.14). Eine pole-zero-cancellation wird ebenso wie eine Verstärkung durchgeführt.

Dieses schmale Signal wird im **Constant-Fraction-Discriminator (CFD)** aufgeteilt. Der eine Teil wird invertiert und um mindestens die Anstiegszeit des ursprünglichen Signals verzögert. Der andere Teil wird um einen konstanten Faktor f verkleinert und beide Signale anschließend überlagert. Als Resultat wird ein Signal mit einem Anstieg in die Richtung des ursprünglichen Signals gefolgt von einer steilen Flanke mit Nulldurchgang erstellt (siehe Seite 19, Abb. 2.15). Dieser erfolgt unabhängig von der Peakhöhe und Abweichungen von der gewünschten Peakform immer beim f -ten Teil des Peak-Maximums. Hierin ist der Vorteil der steilen Anstiegsflanke vom

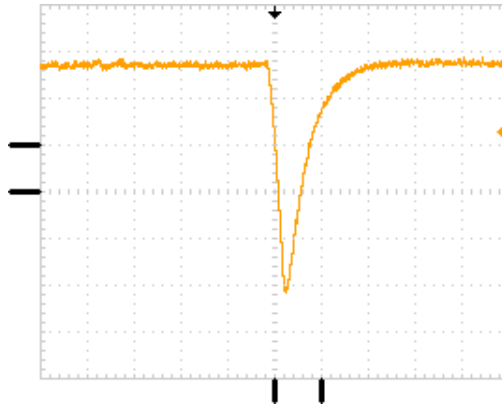


Abbildung 2.14: Das Signal des TFA hat eine Höhe von ca. 1 V und geht recht schnell nach ca. 1 μ s zurück auf die Nulllinie. Achsenbeschriftung: x-Achse 500 ns; y-Achse 200 mV

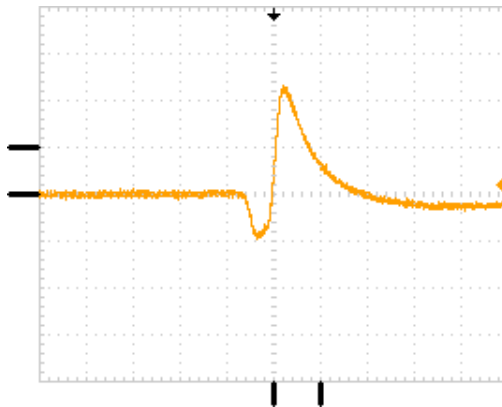


Abbildung 2.15: Innerhalb von ca. 300 ns werden die beiden Maxima des CFD-Signals mit einem Unterschied von ca. 60 mV durchlaufen. Dieses kleine Signal wird zur Bestimmung eines Zeitpunktes verwendet. Achsenbeschriftung: x-Achse 500 ns; y-Achse 20 mV

TFA erkennbar, da so der Nulldurchgang durch den steileren Vorzeichenwechsel deutlicher wird.

An dem so ermittelten Zeitpunkt sendet der CFD ein logisches Gate-Signal aus (siehe Seite 20, Abb. 2.16). Einstellbar ist eine Schwelle, die einkommende Signale überschreiten müssen, um weiter verarbeitet zu werden und die Breite der erzeugten Gate-Signale.

Dieses logische An/Aus-Signal ist im Vergleich zum gaußförmigen Energiesignal zu kurz und zu früh. (siehe Seite 20, Abb. 2.17) Durch zwei Gate-and-Delay-Units wird zum Einen der Startpunkt des Gate-Signals möglichst gut mit dem Startpunkt des Energiesignals überein gebracht, zum Anderen die Länge des Gate-Signals so stark verlängert, dass es das Energiesignal komplett abdeckt (siehe Seite 20, Abb. 2.18). Dies ist jeweils durch regelbare Widerstände möglich.

2.3.3 Digitalisierung

Die beiden Signale werden nun an einen **Analog-to-Digital-Converter (ADC)** geschickt. Dieser wandelt die Amplitude des Signals in ein digitales Signal um, das in einem **Multi-Channel-Analyser (MCA)** in ein Energiehistogramm eingeordnet wird. Üblicherweise akzeptiert ein ADC Signale zwischen 0 V und 10 V. Dieser Spannungsbereich wird entsprechend der Anzahl an Bits, die der ADC unterstützt, in gleich große Abschnitte, die sogenannten Bins, unterteilt. Diese geben an, welche Spannungsunterschiede als gleich eingeordnet werden, obwohl sie unterschiedlich sind. Je

2 Aufbau und technische Grundlagen

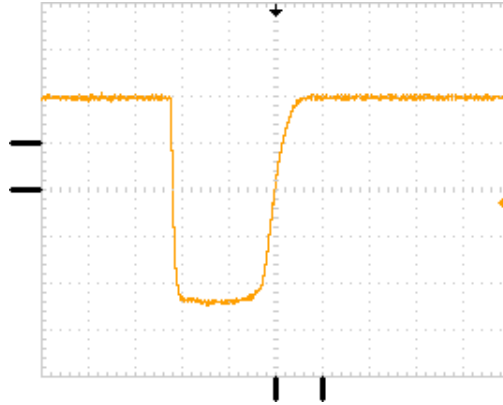


Abbildung 2.16: Das annähernd stufenförmige Gate-Signal hat eine Höhe von ca. 840 mV und dauert ca. 180 ns an. Es bildet die binären Zustände 1 und 0 ab. Achsenbeschriftung: x-Achse 100 ns; y-Achse 200 mV

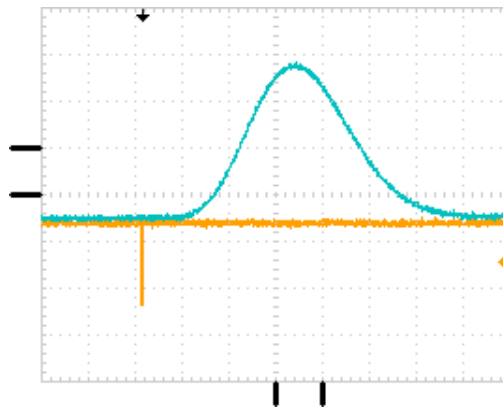


Abbildung 2.17: Das Gate-Signal ist zu kurz, um zur weiteren Verarbeitung zusammen mit dem Energiesignal verwendet zu werden. Achsenbeschriftung: x-Achse 5 μ s; y-Achse 500 mV

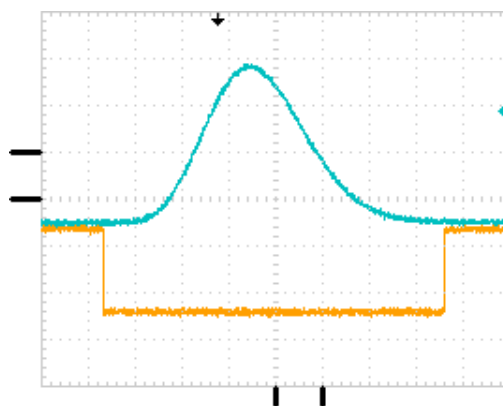


Abbildung 2.18: Das Gate-Signals dauert ca. 36 μ s und ca. 900 mV hoch. Es dauert damit länger, als das Energiesignal, um größere Signale als das hier gezeigte komplett zu erfassen. Achsenbeschriftung: x-Achse 5 μ s; y-Achse 500 mV

größer die Anzahl an Bits ist, desto besser ist auch das digitalisierte Spektrum.

Zur Digitalisierung der Amplitude in ADCs gibt es hauptsächlich zwei Methoden.

1. Beim Linear Ramp Converter (Wilkinson Converter) wird die Amplitude des Pulses mit einem linear anwachsenden Signal verglichen. Für die ermittelte Zeitdauer zwischen Start des anwachsenden Signals und dem Erreichen der Amplitude des Pulses wird ein Gate-Signal erzeugt. Für die Dauer dieses Gate-Signals werden die Anzahl an Signale aus einem Oszillator mit konstanter Frequenz gezählt. Die Anzahl der gezählten Zeiteinheiten ist proportional zur Amplitude des eingegangenen Signals und damit zur Energie, die im Detektor deponiert wurde. Diese Anzahl wird digitalisiert und an den MCA weitergegeben. Die Dauer des Verfahrens ist vergleichsweise lang, d.h. die Totzeit des ADC ist hoch. Dafür sind die digitalisierten Werte gut linear, d.h. über einen großen Bereich sind für zwei Pulse des Verhältnis ihrer Energien und das Verhältnis der zugeordneten Bins ungefähr gleich.
2. Beim Successive Approximation ADC wird die Amplitude des eingehenden Pulses nacheinander mit dem 2^n -ten Teilen der maximalen Amplitude des ADC verglichen. Liegt die Amplitude darunter, wird eine 0 gespeichert. Liegt er darüber, wird eine 1 erzeugt und der Vergleichswert vom eingehenden Puls abgezogen, damit der Vergleich im nächsten Schritt möglich ist. Um das ungenaue Verkleinern des Pulses zu vermeiden, kann alternativ durch einen Digital-to-Analog-Converter die benötigte Referenzamplitude erstellt werden, z.B. für den 2. Vergleichsschritt entweder 75% oder 25% der maximalen Amplitude des ADC. Die Anzahl n gibt die Bit-Zahl des ADC und die Auflösung an. Eine größere Anzahl ergibt eine bessere Energieauflösung, da der Puls häufiger verglichen wird und genauer bestimmt werden kann. Vorteil dieser Methode ist die feste Konvertierungszeit eines Pulses bei fester Bit-Zahl, unabhängig von der Pulshöhe. Dafür ist die Linearität beim Wilkinson Converter besser.

Der Akzeptanzbereich für einkommende Signale ist durch die maximale und minimale Spannung manuell einstellbar, ebenso mit dem „zero-Bin“ das kleinste zu füllende Bin. Ein Offset gibt eine untere Grenze für digitalisierte Signale an, die vom ADC weitergeleitet werden. Über einen Gain ist die verwendete Bit-Anzahl einstellbar und über eine Range eine obere Grenze, bis zu der digitalisierte Signale angenommen werden. Das einkommende Gate-Signal vom CFD kann verwendet werden, um koinzident oder antikoinzident zu messen. Im ersten Fall beachtet der ADC nur Signale, die zeitgleich zum Gate-Signal einkommen, im zweiten Fall nur die Signale, die nicht zeitgleich ankommen.

Durch die Benutzung der Gate-Signale ergeben sich noch zwei weitere Vorteile. Der Zeitpunkt des Detektorsignals ist bestimmbar und kann für die Bestimmung von Koinzidenzen zwischen mehreren Detektoren verwendet werden. Weiterhin beachtet der ADC nur eine Zeitspanne, in der mit einem Signal zu rechnen ist. Dies verringert den Hintergrund, da das Rauschen zwischen den gewünschten Signalen ignoriert wird und dort ein ungewünschter Peak erkannt und digitalisiert wird. Ebenfalls wird die Totzeit des ADC durch die Vermeidung ungewünschter Signale verkleinert.

2.3.4 Digitizer

Mit der Weiterentwicklung der digitalen Elektronik ist eine dritte Möglichkeit der Umwandlung von analogen in digitale Signale praktikabel geworden. In einem Digitizer wird das Signal aus dem Detektor direkt digitalisiert und mit Hilfe von Software die erhaltenen Daten verarbeitet. Dabei wird der Zeitpunkt des Signals bestimmt und die Form des Signals zur Bestimmung der Amplitude umgewandelt (siehe Seite 22, Abschnitt 2.3.5).

In dieser „brute-force“ Methode wird die Spannung des einkommenden Signals in regelmäßigen Zeitabständen, den Samples, ausgelesen. Danach kommen Flash-ADCs zum Einsatz, die die ausgelesenen Spannungswerte in digitale Werte umwandeln. Dazu wird die ausgelesene Spannung

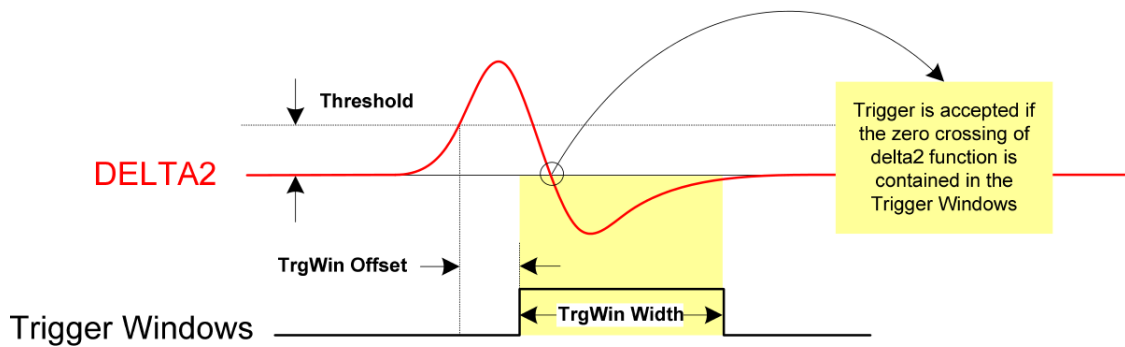


Abbildung 2.19: Überschreitet die zweite Ableitung einen Schwellenwert, wird nach einer Verzögerung in einem Triggerfenster nach einem Nulldurchgang gesucht, um den Trigger zu bestätigen. [9]

gleichzeitig mit 2^n Referenzwerten verglichen, die eine 1 oder eine 0 ausgeben. Dieses Verfahren ist ähnlich wie beim Successive Approximation ADC. Auch hier resultiert eine größere Anzahl n an Bits in einer besseren Auflösung, aber auch in einer größeren Anzahl an gleichzeitigen Vergleichen. Es wird eine hohe Sample-Rate und hohe Bitanzahl bei kurzer Digitalisierungszeit benötigt, damit das Signal aus den einzelnen Datenpunkten erkennbar bleibt und die Form des Peaks möglichst gut abgebildet wird.

2.3.5 Trigger und Trapezfilter

Ein weiterer Vorteil der Benutzung von digitaler Elektronik ist die Umwandlung der einkommenden Signale in Formen, die von analoger Elektronik gar nicht oder nur unter größerem Aufwand herzustellen sind, aber die die wichtigen Informationen leichter auslesbar machen. Gut geeignet ist dafür eine Trapezform. Diese Signalform erreicht seine Höhe nach einer festen Zeit und hält diesen Wert für eine feste Dauer. Dies erleichtert die Bestimmung der Amplitude, da diese immer zur gleichen Zeit nach Eingang eines Signals ausgelesen werden kann.

Dabei fährt ein Auslesefenster Sample für Sample das digitalisierte Signal ab und bildet den Mittelwert. Erreicht dieses Fenster die steile Anstiegsflanke eines einkommenden Signales werden mit Hilfe eines Parameters für die Anstiegszeit die 1. und 2. Ableitung gebildet. Übersteigt der Wert der 2. Ableitung einen Schwellenwert, beginnt nach einer Verzögerung ein Zeitfenster für den Trigger. Hat die 2. Ableitung innerhalb dieses Zeitfensters einen Nulldurchgang, wird der Trigger akzeptiert, sonst verworfen. (siehe Seite 22, Abb. 2.19) Länge des Auslesefensters und Zeitfenster, Verzögerung und Anstiegszeit sind jeweils einstellbar. Im Vergleich zur Anstiegsflanke ist die Abfallflanke sehr lang und für das Auslesefenster sind die Werte nach Erreichen des Peaks nahezu konstant. Wurde der Trigger akzeptiert, wird dieser Wert für die Amplitude weiterverwendet. Innerhalb einer Anstiegs- und Abfallzeit für das zu erstellende Trapez wird nun diese Amplitude erreicht und für eine gewisse Zeit ein flaches Plateau erstellt, bevor die Abfallflanke beginnt. Auch hier mittelt ein Auslesefenster die Samples, gibt aber den Wert der Amplitude erst nach einer Verzögerung nach Ablauf der Anstiegszeit weiter. (siehe Seite 23, Abb. 2.20) So wird verhindert, dass Abflachungen des Trapez durch unterschiedliche Signalformen einfließen. Die genannten Zeiten sind jeweils einstellbar. Die Energie in Form der Amplitude ist durch die Mittelungen des Rauschen und die Bestimmung der Nulllinie vor und nach dem Trapez genauer bestimmbar.

2.3.6 Multi-Channel-Analyser

Der Multi-Channel-Analyser (MCA) empfängt die vom ADC oder Digitizer digitalisierten Pulshöhen und zählt die Anzahl der erhaltenen Signale pro eingestelltem Kanal. Dabei wird üblicherweise die gleiche Bit-Zahl und damit Kanäle wie der ADC oder Digitizer verwendet, damit die

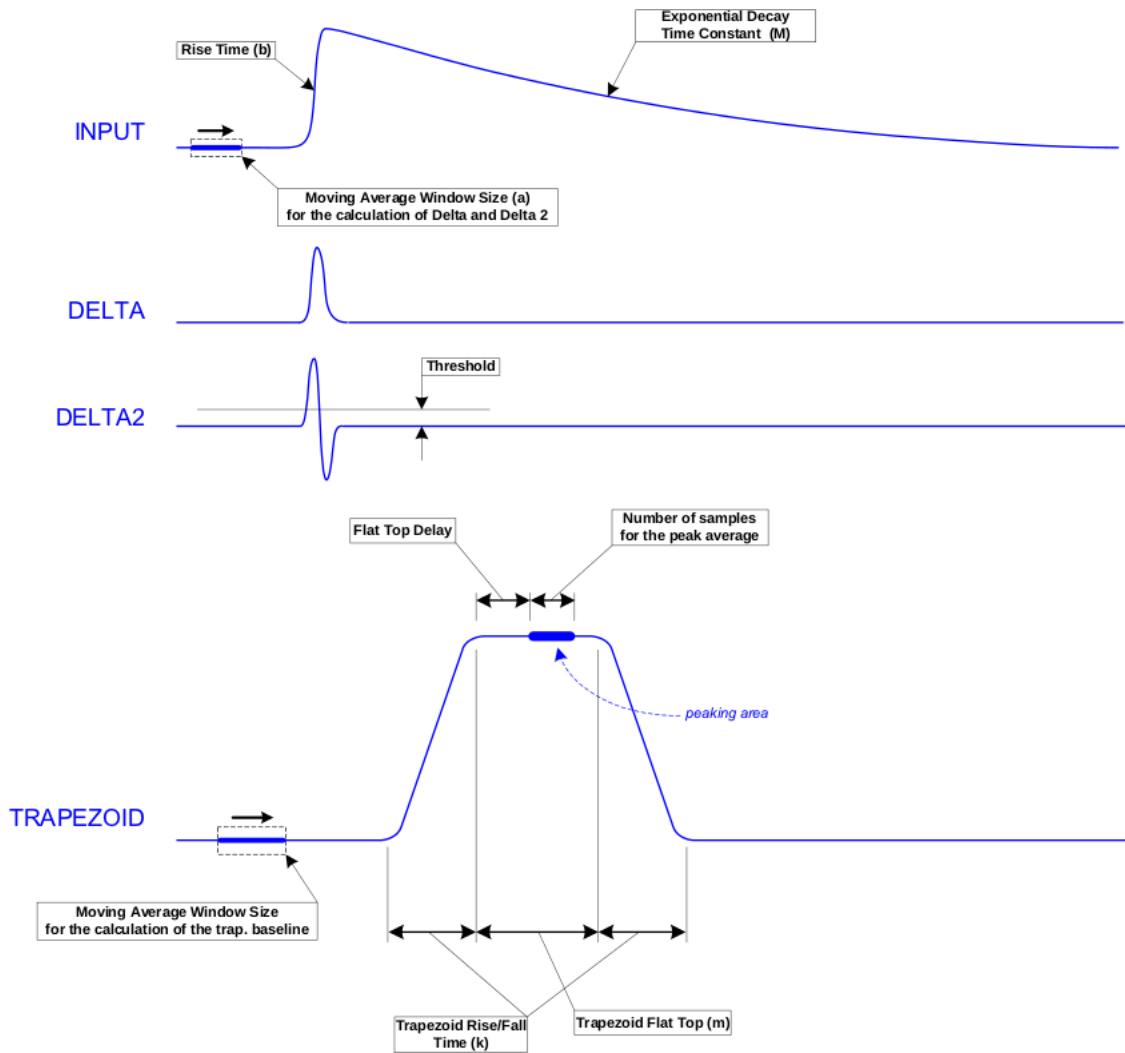


Abbildung 2.20: Als Eingangssignal kommt eine steile Flanke mit langen exponentiellen Abfall an. Mit den Werten des Auslesefenster wird die erste und zweite Ableitung gebildet und der Trigger überprüft. Anschließend wird ein Trapez geformt dessen Plateauwert nach einer Verzögerung ausgelesen wird. Die Anstiegs- und Abfallflanke sind jeweils gleich lang, wobei deren Steigung von der Amplitude des Signals abhängt. [9]

Zuweisung von Energien zu Kanälen erhalten bleibt. So wird ein Energiehistogramm erzeugt, das die Energie gegenüber der erhaltenen Anzahl aufträgt. Durch die Kenntnis der Messzeit und der Totzeit der Geräte ist es so möglich, aus der Anzahl an Pulsen eine Rate von ausgesendeten Photonen einer festen Energie zu machen. Ist auch die Anzahl der auf die Probe geschossenen Teilchen bekannt, kann der gesuchte Wirkungsquerschnitt ausgerechnet werden.

Bei einem Clover-Detektor bietet sich neben der Aufnahme des reinen Energiespektrums noch die Nutzung der Zeitpunkte der einkommenden Signale an. Im sogenannten List-Modus speichert der MCA für jede einkommende Pulshöhe eines Kristalls, also für jedes aufgetretene Event, in einem nachfolgenden einstellbaren Zeitfenster die Werte der anderen Kristalle. Dadurch ist die Rekonstruktion von Ereignissen möglich, bei denen das Photon einen Teil seiner Energie in einem Kristall und einen anderen Teil seiner Energie in einem anderen Kristall abgegeben hat. Die Anzahl an Counts einer untersuchten Energie wird somit genauer bestimmbar. Dies ist vor allem bei hohen Raten von Bedeutung, da durch die erhöhte Gesamtanzahl an Photonen auch die Anzahl der Photonen höher ist, die ihre Energie in mehreren Kristallen deponieren.

Bei den erhaltenen Energiehistogrammen ergibt sich aber in der Praxis das Problem, dass die Peaks relativ zu einander aufgetragen sind und einem Kanal zugeordnet werden können, aber noch keiner Energie. Deshalb werden Eich- oder Kalibrationsquellen verwendet, um eine Funktion zur Zuordnung von Kanälen zu Energie zu bestimmen. Diese Quellen geben durch einen Zerfall Photonen mit bekannter Energie ab, deren Peaks einem Kanal zugeordnet werden können. Üblicherweise sind Quellen im Einsatz, deren Peaks in dem zu untersuchenden Energiebereich liegen und mehr als einen Peak zur Kalibration haben. Die Linearität der Digitalisierung der Pulshöhen ist damit ebenfalls überprüfbar. Dafür werden die Abweichungen der gemessenen von der durch die Kalibration erwarteten Position bestimmt.

2.4 Datenauswertung

Mit der Energiekalibration als Hilfsmittel werden für die Auswertungen noch die Position und Form der Peaks, deren Halbwertsbreite (FWHM: **F**ull **W**idth at **H**alf **M**aximum) als Maß für die Energieauflösung und die Anzahl an Counts im Peak in einem geeigneten Programm betrachtet. Ist auch die Zeitinformation des Signals verfügbar, können zeitliche Koinzidenzen bestimmt oder die Energieabgabe in mehreren Detektoren rekonstruiert werden. Für die Form des Peaks wird in den meisten Fällen eine Gaußverteilung erwartet.

Dies hat mehrere Gründe: Die ursprünglich ausgesendeten Photonen haben eine natürliche Linienbreite, da das Energieniveau des aussendenden Kerns auf Grund der Unschärferelation $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ schon keine eindeutig festgelegte Energie hatte. Auch ist die Elektronik zur Detektion und Verarbeitung des Signals fehlerbehaftet, sodass in jedem Zwischenschritt die verarbeitete Information ungenauer wird. Die natürliche Linienbreite ist aber im Vergleich zu den Fehlern durch die Verarbeitung zu vernachlässigen. Daneben kann es passieren, dass ein niederenergetischer Ausläufer am Gaußpeak zu sehen ist. Dieser resultiert aus der unvollständigen Abgabe der Photonenenergie in einem Detektor und tritt meist bei hohen Raten auf. Die oben genannten Parameter sind bestimmbar durch das Anpassen der Peaks im Spektrum, die durch Software oder per Augenmaß erkannt werden, mit einer Gaußfunktion (siehe Formel 2.3).

$$f(x) = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) + B = \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) + B \quad (2.3)$$

- Die Amplitude A gibt die Höhe des Maximums an. C ist der Flächeninhalt unter der Kurve, da die Gaußfunktion auf 1 normiert ist.
- μ gibt die Position des Peaks in Kanälen an, die durch die Kalibrierung in eine entsprechende Energie umgerechnet werden kann. Durch den Vergleich mit einer Datenbank oder Nuklidtafel, die die charakteristischen Gamma-Energien enthält, ist die Bestimmung des aussendenden Nuklid möglich. In einem Aktivierungsexperiment oder bei einer Eichquelle ist das

Nuklid bekannt, sodass der umgekehrte Weg genommen wird und der erwartete Peak im Spektrum gesucht wird.

- Die Standardabweichung σ kann in die Halbwertsbreite umgerechnet werden:

$$FWHM \approx 2.3548 \cdot \sigma \quad (2.4)$$

Je besser die Energieauflösung ist, desto besser wird das einkommende Photon mit der Energie E in den dazugehörigen Kanal (und nicht in den benachbarten) eingeordnet. Dies ergibt im Spektrum schmale, hohe Peaks mit einer kleinen Halbwertsbreite, die gut von einander unterscheidbar sind. Die Halbwertsbreite gibt somit einen Bereich um eine betrachtete Energie an, in der mit Counts zu rechnen ist, die mit zur Energie gehören.

- Mit dem Wert B wird der Untergrund des Peaks bestimmt. Da dieser nicht vermieden werden kann, wird eine neue „Nulllinie“ angegeben, oberhalb derer die Counts der Probe oder Quelle liegen. Für B wird meist ein fester Wert oder eine Gerade mit Steigung $m \neq 0$ genommen. Im letzteren Fall werden die Werte beim Übergang des Gaußpeaks in den Hintergrund des Spektrums bestimmt und aus beiden der Mittelwert gebildet. Der Mittelwert wird als konstanter Wert unterhalb des gesamten Gaußpeaks verwendet.

Durch die Aufbreitung des Signals durch die Verarbeitung muss für die Anzahl an Counts für eine Energie neben denen im Maximum auch die in den Kanälen rechts und links vom Peak enthaltenen Counts mit berücksichtigt werden. Der Flächeninhalt unter der Gaußkurve entspricht der Anzahl an Ereignissen, die mit dieser Energie stattgefunden haben, also die Anzahl der zu untersuchenden Reaktionen. Mit der Kenntnis der Messzeit im Labor abzüglich der Totzeit der Geräte kann die sogenannte Life-time ausgerechnet werden, die bei der Berechnung der Reaktionsrate verwendet wird.

Gibt die Elektronik von selbst keine Informationen über ihre Totzeit weiter, kann diese auf andere Art bestimmt werden. Dazu werden zwei Quellen für zwei Messungen mit beiden Quellen vor dem Detektor verwendet. Die erste Quelle gilt als Referenz und bleibt bei beiden Messungen an der selben Stelle. Die zweite Quelle wird bei einer Messung sehr nah an den Detektor gelegt, bei der anderen Messung weit weg. Der Abstand und die zweite Quelle sollten so gewählt werden, dass sie in etwa die gleiche Zählrate im Detektor wie die zu untersuchende Probe haben und somit zu einer ähnlichen Totzeit führen. Ohne Totzeit ist die Erwartung, dass beide Peakflächen der Referenzquelle gleich sind. Bei der Messung mit Totzeit können nun nicht alle einkommenden Signale der Referenzquelle verarbeitet werden und die Peakfläche nimmt ab. Aus dem Verhältnis der beiden Flächen kann nun die Totzeit bestimmt werden.

3 Auswertung und Fazit

3.1 Auswertung

Vor den Messungen musste die Elektronik eingestellt werden, damit das später erhaltene Energiehistogramm die gewünschten Informationen gut sichtbar enthielt. Bei der analogen Elektronik wurde dazu nach jedem Modul das Signal mit Hilfe eines Oszilloskop überprüft und angepasst. Beim Digitizer erfolgte dies durch Ändern der Softwareparameter für den Trigger und Trapezfilter. (siehe Seite 28, Abb. 3.1) In beiden Fällen wurde die Verstärkung so gewählt, dass die beobachteten Peaks gut sichtbar und mit etwas Abstand im Spektrum lagen und eine grobe Umrechnung von Kanälen in Energie schnell möglich war, z.B. den Peak für 511 keV auf Kanal 1000 für einen groben Umrechnungsfaktor von 2.

Für die analoge Elektronik wurde zur Auswertung der Spektren das Programm MPAWIN verwendet. Mit MPAWIN war es unter anderem möglich, Bereiche zu vergrößern, eine Energiekalibration durchzuführen, einen Gaußfit zu machen, mehrere Spektren gleichzeitig aufzunehmen und anzuschauen und im List-Mode aufzunehmen. Dabei war darauf zu achten, dass die richtige Anzahl an Spektren mit der richtigen Anzahl an Kanälen eingestellt war, damit alle Spektren korrekt aufgenommen wurden. Die Totzeit wurde vom Programm angezeigt (siehe Seite 28, Abb. 3.2).

Es wurden zwei verschiedene Arten von Messungen jeweils mit analoger und digitaler Elektronik bei gleicher Messdauer durchgeführt:

1. Die ^{22}Na - und ^{60}Co -Quelle wurden einzeln im Abstand von 0, 10, 20, 30, 40, 50 mm vor den Detektor plziert, um die Energieauflösung und -kalibration zu bestimmen.
2. Beide Quellen wurden gleichzeitig vor den Detektor gelegt. Dabei wurden zwei Messungen gemacht, bei denen die ^{22}Na -Quelle im Abstand von 60 mm bzw. 270 mm vom Detektor positioniert war und die ^{60}Co -Quelle im Abstand von 40 mm liegen blieb, um die Totzeit zu bestimmen.

Die Messzeiten zur Bestimmung der Energieauflösung sind in Tabelle 3.1 (siehe Seite 29, Tab. 3.1) aufgeführt. Die Messungen mit beiden Quellen gleichzeitig dauerten jeweils 24 h.

3.1.1 Energieauflösung

Aus den erhaltenen Daten wurde aus der Position der Peaks mit Hilfe von qtiplot eine Energiekalibration in Form einer Geraden ermittelt, die zur Umrechnung von Kanälen in Energie verwendet wurde. Damit wurden die erhaltenen FWHM- oder Sigma-Werte in Energien umgerechnet und verglichen. MPAWIN gab beim Gaußfit direkt die Peakfläche und damit Counts an, beim Digitizer wurde der Parameter A gemäß Formel 2.3 in den Parameter C umgerechnet und so der Flächeninhalt bestimmt. Die Tabellen mit den ermittelten Zahlenwerten sind angehängt.

Die Werte für die Steigung der Kalibrationsgeraden der analogen und digitalen Elektronik wurden geplottet und sind zusammen mit den jeweiligen Mittelwerten dargestellt. (siehe Seite 29, Abb. 3.3) und (siehe Seite 30, Abb. 3.4)

Bei der analogen Elektronik fällt auf, dass die Werte für alle vier Kristalle jeweils um zwei verschiedene Werte gehäuft auftreten. Der eingetragene Mittelwert ist deshalb wenig aussagekräftig.

Bei den ermittelten Steigungen beim Digitizer liegen die Werte für die ersten drei Kristalle maximal 0,007 um den Mittelwert. Beim vierten Kristall macht sich die Verwendung eines anderen Vorverstärkers bemerkbar, da die Steigung im Vergleich zu den anderen signifikant größer

3 Auswertung und Fazit

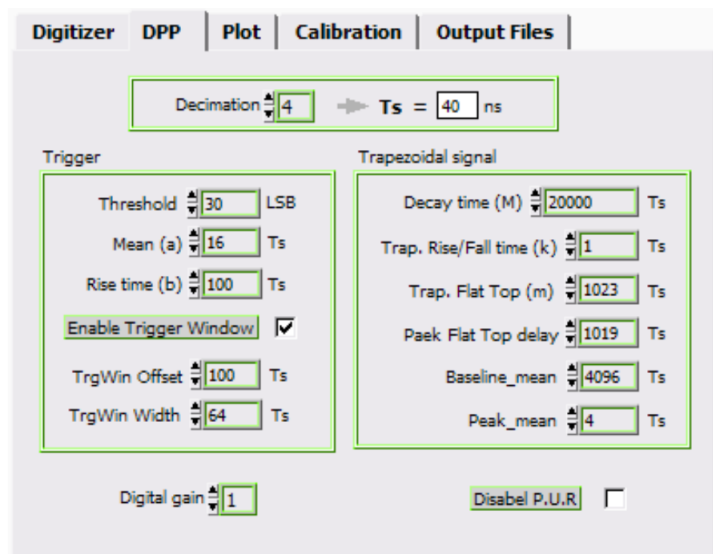


Abbildung 3.1: Die Softwareparameter zum Einstellen des Triggers und Trapezfilters (siehe Seite 22, Abb. 2.19) und (siehe Seite 23, Abb. 2.20) im DPP-Demo-Programms von CAEN. [9]

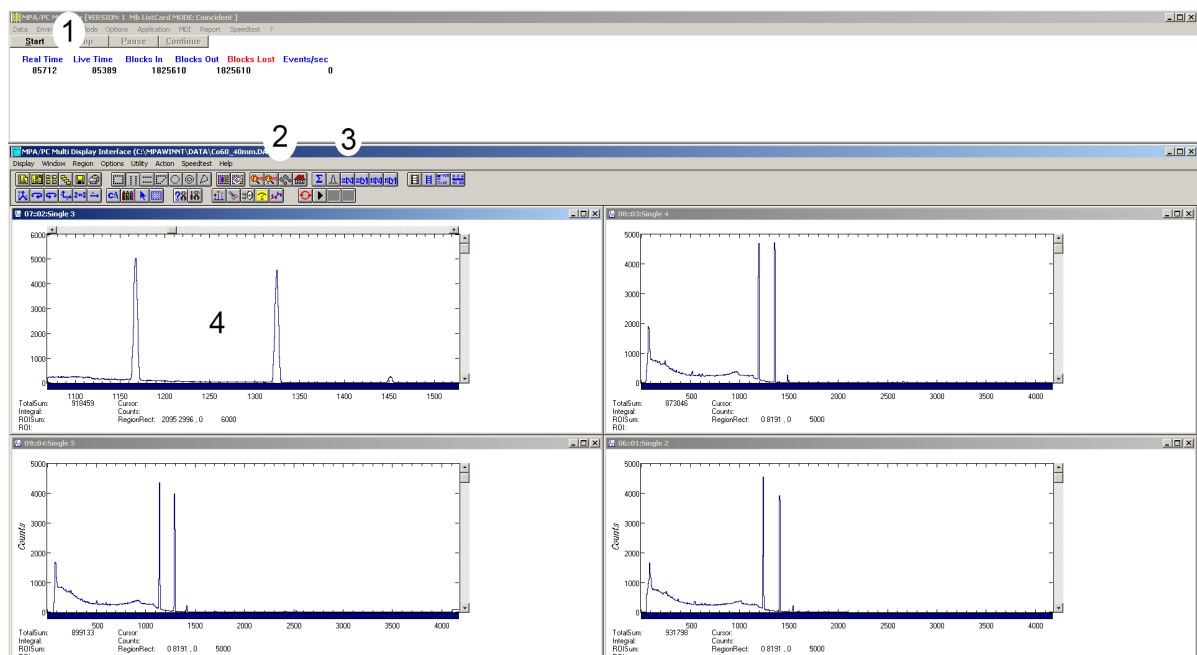


Abbildung 3.2: Die graphische Oberfläche von MPAWIN. 1: Die Realtime ist die Messzeit im Labor, während bei der Livetime die Totzeit bereits abgezogen ist. 2: Die Buttons ermöglichen das Vergößern der Spektren. 3: Der Button für einen Gaußfit. 4: Die beiden Peaks links und in der Mitte stammen von der ^{60}Co -Quelle, der rechts von ^{40}K aus dem Hintergrund. Das Spektrum wurde vergrößert, die anderen drei zeigen es komplett. Jedes Spektrum ist von einem anderen Kristall aufgenommen.

Tabelle 3.1: Messzeiten zur Bestimmung der Energieauflösung

Abstand [mm]	Quelle	Messzeit [sec]
0	Na	2797
10	Na	388
20	Na	813
30	Na	1038
40	Na	1548
50	Na	2118
0	Co	240846
10	Co	165031
20	Co	90178
30	Co	145033
40	Co	85712
50	Co	89323

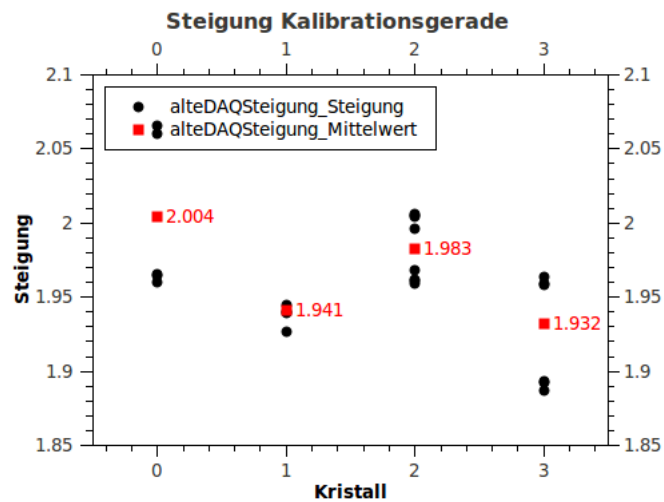


Abbildung 3.3: Aufgetragen sind die Steigung der Kalibrationsgeraden der analogen Elektronik gegen den Kristall. Die ermittelten Werte pro Kristall liegen jeweils um zwei verschiedene Werte verteilt.

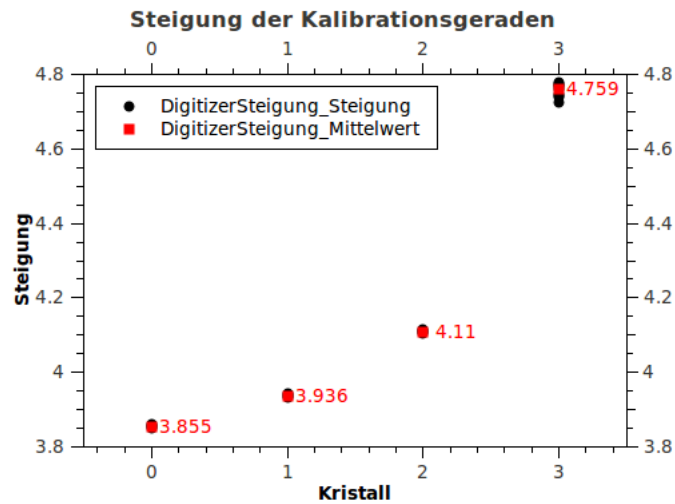


Abbildung 3.4: Aufgetragen sind die Steigung der Kalibrationsgeraden der digitalen Elektronik gegen den Kristall. Die Werte liegen dicht zusammen, wobei im vierten Kristall mit einem anderen Vorverstärker die Verteilung am größten ist.

ist und die ermittelten Werte mit 0,17 weiter um den Mittelwert gestreut liegen. Die Signale dieses Kristalls waren kleiner als die übrigen, sodass sie anfälliger für Rauschen im Kabel waren und die nötige Verstärkung des Spec-Amp höher eingestellt werden musste. Aus den ermittelten Halbwertsbreiten wurde die Differenz für jeweils die gleiche Messung gebildet und zusammen mit den Mittelwerten in Abhängigkeit des Kristalls, der Energie und des Abstands aufgetragen. Dabei bedeuten negative Werte, dass die Halbwertsbreiten vom Digitizer kleiner und damit besser waren. (siehe Seite 31, Abb. 3.5), (siehe Seite 31, Abb. 3.6) und (siehe Seite 32, Abb. 3.7)

Wird der Plot in Abhängigkeit zur Energie betrachtet, liegen alle fast alle ermittelten Differenzen in einem Bereich von ± 1 keV um den Mittelwert. Die Abweichungen treten somit gleichmäßig über das gesamte Spektrum auf. Die Mittelwerte der ^{22}Na -Linien liegen bei ca. $-0,5$ keV und sind ca. $0,5$ keV größer, als die der ^{60}Co -Linien. Die Mittelwerte befinden sich recht nah um den Wert $-0,8$ keV, wobei die übrigen Werte für alle Abstände in einem Bereich von ca. $\pm 0,75$ keV darum liegen. Lediglich im Abstand von 0 mm liegen die Werte in einem Bereich von ca. 3 keV sehr weit auseinander gestreut. Die Mittelwerte für die Abstände 0 mm und 10 mm sind im Vergleich mit ca. $-0,66$ keV etwas weiter von den anderen entfernt und größer.

In Abhängigkeit zum Kristall ist im Plot erkennbar, dass die vier Mittelwerte recht verschieden sind. Die Abweichung der FWHM der beiden Messmethoden ist dabei im ersten Kristall am kleinsten und im zweiten Kristall am größten. Bei diesen beiden Kristallen liegt auch ein Großteil der Werte in einem Bereich von ca. $\pm 0,5$ keV, während bei den anderen beiden die Werte in einem größeren Bereich von ca. $\pm 0,75$ keV liegen. Die Datenpunkte des dritten und vierten Kristalles liegen weit auseinander. Die Mittelwerte sind ebenfalls recht verschieden, wobei der vom ersten Kristall mit $-0,388$ keV am wenigsten und der vom zweiten mit $-1,2$ keV am stärksten von Null abweicht.

3.1.2 Totzeit

Bei manchen der Messungen mit beiden Quellen war neben den vier Peaks der Quellen auch noch eine Linie von natürlichem ^{40}K bei 1461 keV zu sehen. Sie wurde dort für die Energiekalibration genutzt, aber wegen zu geringer Statistik für die Totzeitmessung nicht berücksichtigt.

Bei der analogen Elektronik lagen die Peaks bei beiden Messungen ungefähr an den gleich Positionen, sodass die Steigung der Kalibrierungsgeraden in beiden Fällen gleich war. Die in MPAWIN ermittelten Peakflächen ergaben im Verhältnis der beiden Messungen in Übereinstimmung mit der

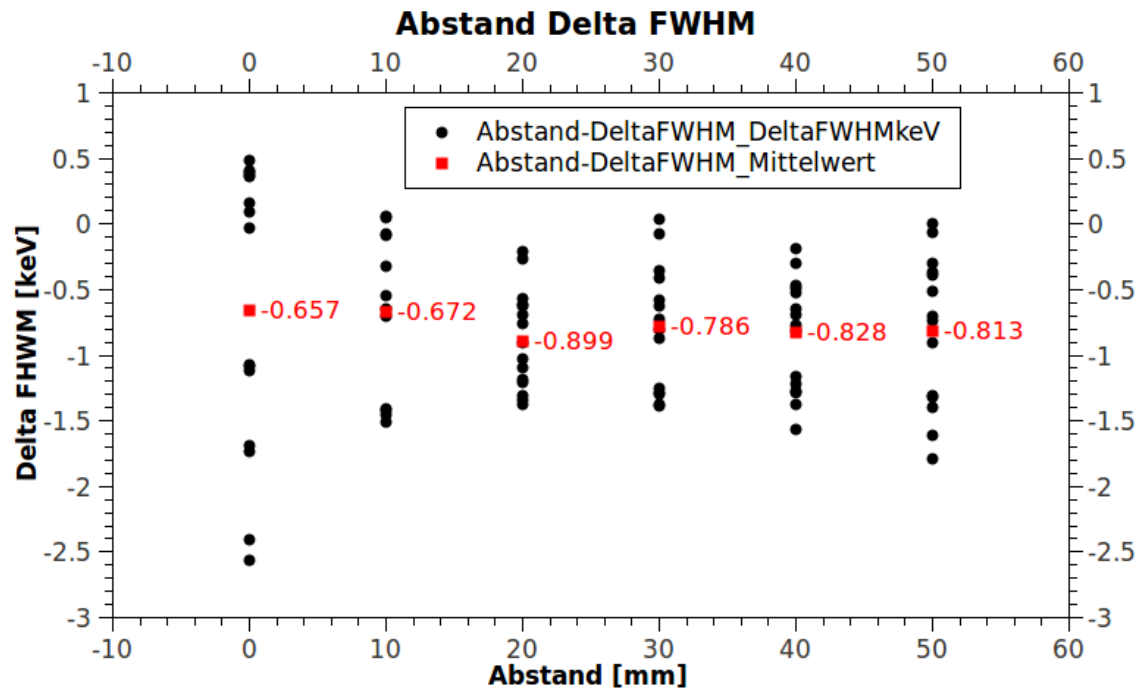


Abbildung 3.5: Die Differenz der Halbwertsbreiten zwischen analoger und digitaler Elektronik aufgetragen gegen den Abstand der Quelle. Rot markiert ist der Mittelwert.

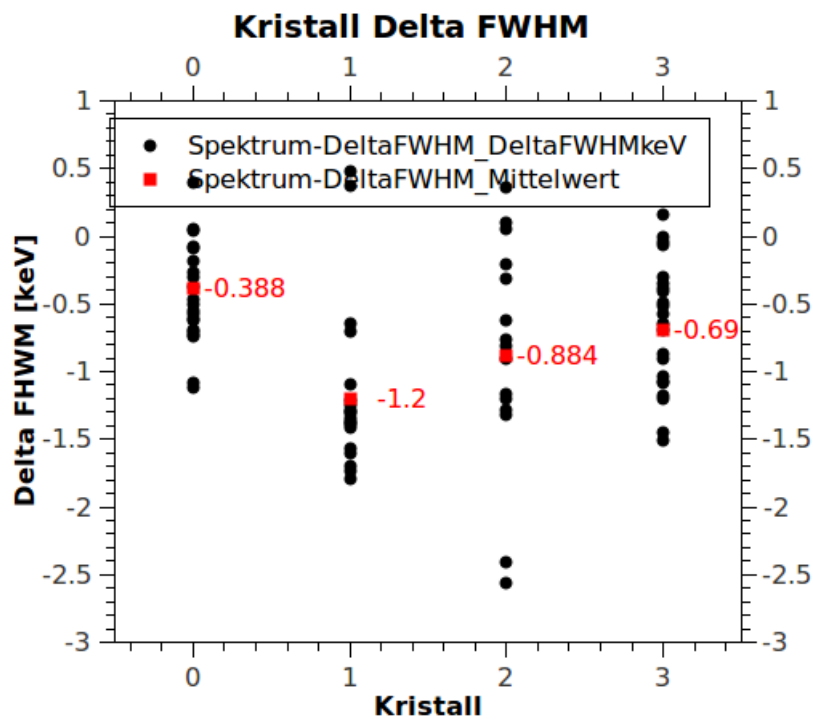


Abbildung 3.6: Die Differenz der Halbwertsbreiten zwischen analoger und digitaler Elektronik aufgetragen gegen den Kristall. Rot markiert ist der Mittelwert.

3 Auswertung und Fazit

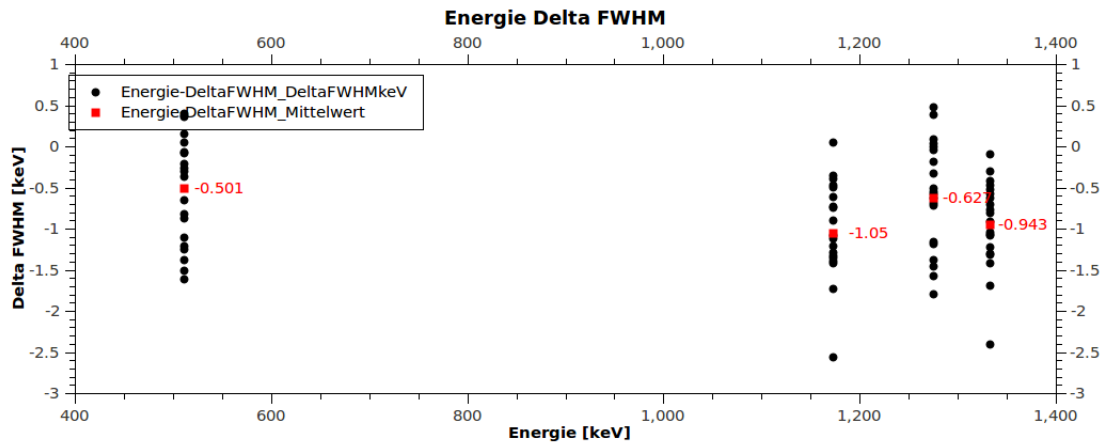


Abbildung 3.7: Die Differenz der Halbwertsbreiten zwischen analoger und digitaler Elektronik aufgetragen gegen die Energie des Peaks. Rot markiert ist der Mittelwert.

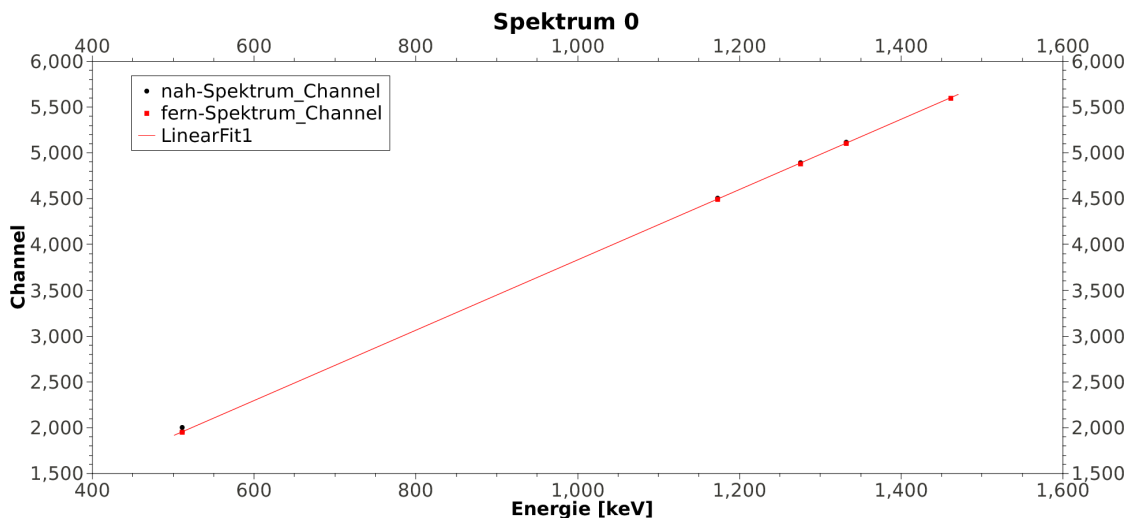


Abbildung 3.8: Kalibrationsgerade des Digitizers bei der Messung mit beiden Quellen

Angabe des Programms einen Wert von η 0,88, also etwas über 10% Totzeit. (siehe Seite 33, Tab. 3.2) Kristall drei jedoch hat für beide untersuchten Peaks ein Verhältnis von ca. 0,45. Insbesondere die Peakflächen für die Messung mit beiden Quellen nah am Detektor sind im Vergleich mit den anderen Kristallen wesentlich kleiner, sodass vermutlich hier ein Problem aufgetreten ist.

Die Werte für den Digitizer lagen für beide Messungen recht nahe zusammen, sodass eine Gerade zur Kalibration beider Messungen genutzt wurde. (siehe Seite 32, Abb. 3.8)

Bei der Messung mit der ^{22}Na -Quelle weit vom Detektor entfernt, hatte das Spektrum des dritten Kristalles Doppelpeaks. Dieses wurde bei der Bestimmung der Peakflächen nicht beachtet, da die Werte vermutlich zu ungenau sind. Da in beiden Messungen Probleme mit diesem Kristall aufgetreten sind, sollte dieser nach Möglichkeit auf eventuelle Defekte überprüft werden. Inwiefern dies Auswirkungen auf die vorher durchgeführten Messungen der Energieauflösung hatte, ist unklar.

Die ermittelten Verhältnisse der Peakflächen beim Digitizer sind alle größer als 1. (siehe Seite 33, Tab. 3.2) Erwartet wurde ein Wert kleiner 1, im Idealfall gleich 1. Die Anzahl an Counts N ist zu groß, um diese Abweichung im Rahmen der Statistik zu erklären. Wird eine Poisson-Verteilung zu Grunde gelegt, ergibt sich ein Fehler proportional zu \sqrt{N} . Dieser Fehler von einigen hundert Counts ist kleiner als die ermittelte Differenz von einigen tausend Counts.

Tabelle 3.2: Die Verhältnisse der ermittelten Peakflächen. Die obere Hälfte ist für die digitale, die untere für die analoge Elektronik. Nah und fern bezieht sich auf den Abstand der ^{22}Na -Quelle vom Detektor. Die Werte sind in aufsteigender Reihenfolge des Kristalls angegeben.

Energie [keV]	Fläche nah	Fläche fern	Verhältnis
1,173	59.331	53.854	1,102
1,173	84.287	69.332	1,216
1,173	80.407		
1,173	61.654	54.360	1,134
1,332	52.784	49.422	1,068
1,332	73.542	62.136	1,184
1,332	74.624		
1,332	55.140	47.397	1,163
1,173	36.628	42.110	0,8698
1,173	36.296	41.168	0,8817
1,173	14.693	33.038	0,4447
1,173	32.858	36.519	0,8998
1,332	32.362	37.525	0,8624
1,332	32.271	37.135	0,869
1,332	14.756	30.890	0,4777
1,332	27.867	32.992	0,8447

Im Vergleich der Messungen untereinander bzw. der Kristalle untereinander sind Ähnlichkeiten erkennbar. Die Werte sind jeweils ungefähr die gleiche Größenordnung und auch die Verhältnisse pro Kristall haben eine Abweichung zwischen den beiden Peaks von ca. 0,03. Im Vergleich zwischen analoger und digitaler Elektronik ist jedoch auffällig, dass der Digitizer ca. zweimal so viele Counts hat.

3.2 Fazit

Beim Betrachten der Spektren fiel auf, dass trotz der Verwendung des besseren der zwei Kabel pro Kristall manche Spektren keine Counts enthielten oder die Peaks doppelt vorkamen. Diese wurden bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Dieses Problem ließe sich eventuell durch die Verwendung neuer Kabel bzw. Stecker vermeiden.

Vermutliche Ursache für die verschiedenen Werte der Steigung der Kalibrationsgeraden der analogen Elektronik ist nicht ein Fehler in der Verarbeitung, sondern ein versehentliches Umstellen der Verstärkung. Dies sollte eigentlich aber keinen nennenswerten Einfluss auf die Bestimmung der FWHM in keV haben, da die Steigung für jedes Spektrum einzeln bestimmt wurde. Durch eine Veränderung der Verstärkung vergrößert oder verkleinert sich zwar die FWHM in Kanälen, aber auch gleichzeitig die Position der Peaks im gleichen Maße, was durch die veränderte Steigung bei der Umrechnung in keV kompensiert wird.

Insgesamt liefert der Digitizer bessere Ergebnisse für die Halbwertsbreite. Dabei hat der Abstand der Probe wenig Einfluss auf die Mittelwerte, aber bei kleinen Abständen lagen die Werte weiter auseinander. Die Energie hat wenig Einfluss auf den Bereich der Werte, bei der ^{22}Na -Quelle waren die Mittelwerte aber größer. Dies deutet darauf hin, dass bei höheren Raten der Digitizer zwar bessere FWHM als eine analoge Elektronik liefert, aber dennoch die hohe Rate zu einer etwas schlechteren Energieauflösung im Vergleich führt. Dass dies dennoch besser ist, als bei einem HPGe-Detektor bestehend aus einem Kristall mit gleichen Volumen, ist zu erwarten, aber im Rahmen dieser Arbeit nicht quantitativ zu bestimmen.

3 Auswertung und Fazit

Die getroffenen Aussagen über bessere oder schlechtere Auflösung zwischen analoger und digitaler Elektronik sind aber mit Vorsicht zu behandeln. So kann eine schlechte Einstellung der Module dazu führen, dass die Werte für den Digitizer besser erscheinen, als sie sind. Auch sind hier drei verschiedene Parameter, Kristall, Abstand, Energie, die jeweils für eine Verschlechterung der Messung führen können. Speziell bei Messungen mit der ^{22}Na -Quelle direkt vor dem Detektor können kleine Abweichungen in der Position der Probe mehr Strahlung in einen Kristall als in die anderen gelangen lassen und dann wie oben als Möglichkeit angedeutet wegen der höheren Rate zu schlechteren Ergebnissen führen.

Diese Parameter und die verwendeten 2D-Plots können auch eine Erklärung für die teilweise große Verteilung der ermittelten Werte sein. Eine Auftragung verschiedener Messreihen mit jeweils den selben Parametern erlaubt sicherlich eine bessere Beurteilung der Differenzen der FWHM, da hier mögliche Zusammenhänge zwischen den drei Größen nicht beurteilt werden können. Ob die verstellte Verstärkung auf Grund anderer Effekte doch Auswirkungen hat, ist nicht auszuschließen. Diese Kombination spielt sicherlich bei den Extremwerten eine Rolle, d.h. bei den Differenzen mit ca. $-2,5$ keV und ca. $+0,5$ keV. Insbesondere Letzteres bedeutet, dass die analoge Elektronik Peaks mit kleinerer Halbwertsbreite als der Digitizer aufgenommen hat.

Im Vergleich der Werte mit den Referenzwerten von etwas unter 2 keV Halbwertsbreite unter Verwendung analoger Elektronik, die Canberra bei Auslieferung mitgegeben hat, sind die hier ermittelten Halbwertsbreiten doch deutlich größer. Diese lassen sich mit einer genaueren Einstellung der Module bzw. Parameter für den Digitizer bestimmt noch verbessern. Auch lassen sich mit weiteren Messreihen bessere Aussagen darüber machen, um wie viel die Ergebnisse vom Digitizer im Vergleich zur analogen Elektronik abweichen.

Die Messung der analogen Elektronik bestätigt das prinzipielle Funktionieren der verwendeten Methode zur Bestimmung der Totzeit. Warum die Messung mit digitaler Elektronik außerhalb des statistischen Fehlers unerwartete Ergebnisse liefern, ist zu diesem Zeitpunkt ungeklärt.

Neben den bei der Energieauflösung ermittelten Fehlerquellen ist bei dieser Messung eine weitere der Untergrund des Peaks bei 1173 keV. Dieser liegt zwischen dem Peak bei 1275 keV der ^{22}Na -Quelle und deren Comptonkante. In diesem Energiebereich werden die Photonen registriert, die mehrmals an Elektronen gestreut wurden. Im Vergleich mit der anderen Messung ist dieser Untergrund merklich größer und der Peak bei 1173 keV liegt in einem abfallenden Bereich. (siehe Seite 35, Abb. 3.9) Eine Quelle, die diesen Energiebereich möglichst unbeeinflusst lässt, erscheint deshalb für diese Messung eine bessere Wahl zu sein.

Die Erwartung, dass der Digitizer totzeitfrei misst, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht bestätigt. Diese nach der gemachten Messreihe aber zu verwerfen, erscheint nicht sinnvoll. Es wurden einige Fehlerquellen identifiziert, die auf die ermittelten Peakflächen ebenso Einfluss haben, wie auf die untersuchten Energieauflösungen.

Da die Auflösung zumindest etwas besser und zugleich der operative Aufwand zum Betreiben wesentlich geringer ist, da eine manuelle Kalibration vieler Module entfällt, lohnt sich der Einsatz eines Digitizers für diese Art von Experimenten trotz der hier ermittelten Fehlerquellen und Probleme.

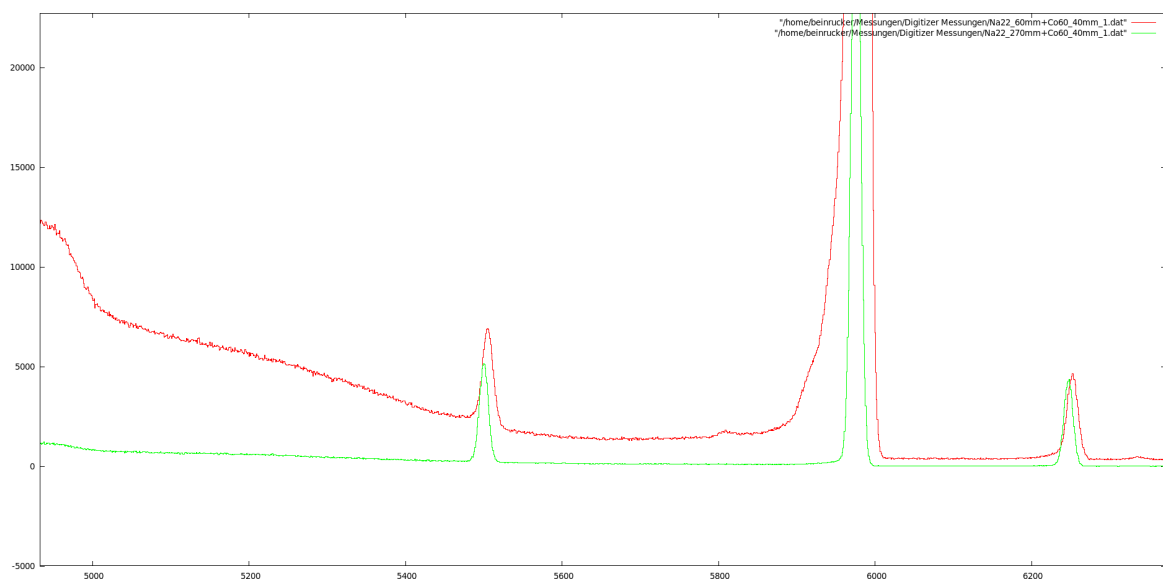


Abbildung 3.9: Vergleich der Spektren der beiden Messungen zur Bestimmung der Totzeit. Vergrößert wurde der Bereich um die beiden Peaks der ^{60}Co -Quelle, rechts und links. In Rot die Messung mit der ^{22}Na -Quelle nah am Detektor, in Grün fern vom Detektor. Der Untergrund ist beim Plot in Rot merklich größer. Die Comptonkante des mittleren Peaks ist am linken Bildrand zu erkennen.

Literaturverzeichnis

- [1] <http://pro.ganil-spiral2.eu/laboratory/detectors/exogam/exogam-detectors>, 9. 2011.
- [2] E. Uberseder, R. Reifarth, D. Schumann, I. Dillmann, C. Domingo Pardo, J. Görres, M. Heil, F. Käppeler, J. Marganec, J. Neuhausen, M. Pignatari, F. Voss, S. Walter und M. Wiescher: *Measurement of the $^{60}\text{Fe}(n,\gamma)^{61}\text{Fe}$ Cross Section at Stellar Temperatures*. Phys. Rev. Lett., 102:151101, Apr 2009. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.102.151101>.
- [3] S. Dababneh et al.: *Gamma spectroscopy using two Clover detectors in close geometry*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 517, 2003.
- [4] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Na-22_decay_scheme.svg, 9. 2011.
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cobalt-60_Decay_Scheme.svg, 9. 2011.
- [6] Glenn F. Knoll: *Radiation detection and measurement*. John Wiley and Sons, Inc., forth Auflage, 2010.
- [7] Harald Appelshäuser: *Skript zur Vorlesung Kernphysik 1*. WS 10/11.
- [8] <http://iwenzo.de/wiki/Halbleiter>, 9. 2011.
- [9] Carlo Tintori: *DPP TF runner User Manual*.

Anhang

Tabelle A.1: Daten der DAQ mit analoger Elektronik

Abstand [mm]	Kristall	Energie [keV]	Channel	FWHM [ch]	Steigung	FWHM [keV]
0	0	511	1052,678	11,103	2,060	5.39
0	0	1,173	2299,822	9,628	1,965	4.9
0	0	1,275	2626,407	10,115	2,060	4.91
0	0	1,332	2612,228	9,666	1,965	4.919
0	1	511	1001,408	10,305	1,940	5.312
0	1	1,173	2286,345	9,071	1,944	4.666
0	1	1,275	2483,374	9,280	1,940	4.784
0	1	1,332	2595,499	9,112	1,944	4.687
0	2	511	1005,009	9,918	1,997	4.966
0	2	1,173	2285,842	10,592	1,968	5.382
0	2	1,275	2530,439	8,958	1,997	4.486
0	2	1,332	2598,728	10,432	1,968	5.301
0	3	511	969,683	12,478	1,887	6.613
0	3	1,173	2303,532	11,034	1,964	5.618
0	3	1,275	2411,614	11,629	1,887	6.163
0	3	1,332	2615,817	11,113	1,964	5.658
10	0	511	1002,498	13,964	1,960	7.124
10	0	1,173	2300,188	9,954	1,965	5.066
10	0	1,275	2499,834	12,934	1,960	6.599
10	0	1,332	2612,673	10,150	1,965	5.165
10	1	511	1001,666	11,465	1,940	5.91
10	1	1,173	2286,448	9,003	1,944	4.631
10	1	1,275	2483,716	10,655	1,940	5.492
10	1	1,332	2595,623	9,094	1,944	4.678
10	2	511	988,502	10,065	1,962	5.13
10	2	1,173				
10	2	1,275	2487,739	9,510	1,962	4.847
10	2	1,332				
10	3	511	1005,614	15,482	1,959	7.903
10	3	1,173	2303,647	11,098	1,964	5.651
10	3	1,275	2501,946	14,571	1,959	7.438
10	3	1,332	2615,903	11,202	1,964	5.704
20	0	511	1002,289	13,204	1,960	6.737
20	0	1,173	2417,698	9,423	2,066	4.561
20	0	1,275	2499,534	12,532	1,960	6.394
20	0	1,332	2746,135	9,591	2,066	4.642
20	1	511	1001,607	11,254	1,940	5.801
20	1	1,173	2286,784	8,323	1,945	4.279
20	1	1,275	2483,704	10,367	1,940	5.344
20	1	1,332	2595,969	8,317	1,945	4.276
20	2	511	988,408	9,824	1,962	5.007

Tabelle A.1: Daten der DAQ mit analoger Elektronik

Abstand [mm]	Kristall	Energie [keV]	Channel	FWHM [ch]	Steigung	FWHM [keV]
20	2	1,173	2328,870	8,082	2,006	4.029
20	2	1,275	2487,383	9,109	1,962	4.643
20	2	1,332	2647,797	7,320	2,006	3.649
20	3	511	1005,577	14,278	1,959	7.288
20	3	1,173	2220,621	10,261	1,893	5.42
20	3	1,275	2502,070	13,253	1,959	6.765
20	3	1,332	2521,537	10,504	1,893	5.549
30	0	511	1002,207	12,396	1,960	6.324
30	0	1,173	2417,371	9,237	2,066	4.471
30	0	1,275	2499,515	11,328	1,960	5.78
30	0	1,332	2745,833	9,211	2,066	4.458
30	1	511	1001,608	11,103	1,940	5.723
30	1	1,173	2286,567	8,361	1,945	4.299
30	1	1,275	2483,692	10,166	1,940	5.24
30	1	1,332	2595,765	8,307	1,945	4.271
30	2	511	987,993	9,688	1,961	4.94
30	2	1,173	2328,227	8,194	2,005	4.087
30	2	1,275	2486,008	9,168	1,961	4.675
30	2	1,332	2647,014	7,405	2,005	3.693
30	3	511	1005,604	13,669	1,959	6.978
30	3	1,173	2220,455	9,337	1,893	4.932
30	3	1,275	2502,073	12,451	1,959	6.356
30	3	1,332	2521,437	9,547	1,893	5.043
40	0	511	1002,085	11,959	1,960	6.102
40	0	1,173	2417,460	9,243	2,066	4.474
40	0	1,275	2499,317	11,149	1,960	5.688
40	0	1,332	2745,965	9,322	2,066	4.512
40	1	511	1001,583	11,055	1,940	5.698
40	1	1,173	2286,637	8,205	1,945	4.219
40	1	1,275	2483,635	10,101	1,940	5.207
40	1	1,332	2595,852	8,185	1,945	4.208
40	2	511	987,057	9,635	1,959	4.918
40	2	1,173	2328,056	8,300	2,005	4.14
40	2	1,275	2483,563	9,020	1,959	4.604
40	2	1,332	2646,893	7,357	2,005	3.669
40	3	511	1005,686	13,210	1,959	6.743
40	3	1,173	2220,661	9,389	1,893	4.96
40	3	1,275	2502,063	12,293	1,959	6.275
40	3	1,332	2521,632	9,498	1,893	5.017
50	0	511	1001,972	11,913	1,960	6.078
50	0	1,173	2417,405	9,281	2,066	4.492
50	0	1,275	2499,150	11,079	1,960	5.653
50	0	1,332	2745,850	9,325	2,066	4.514
50	1	511	1001,536	11,072	1,927	5.746
50	1	1,173	2286,583	8,398	1,944	4.32
50	1	1,275	2473,607	10,160	1,927	5.272
50	1	1,332	2595,749	8,293	1,944	4.266
50	2	511				
50	2	1,173	2327,839	8,291	2,005	4.135

Tabelle A.1: Daten der DAQ mit analoger Elektronik

Abstand [mm]	Kristall	Energie [keV]	Channel	FWHM [ch]	Steigung	FWHM [keV]
50	2	1,275				
50	2	1,332	2646,580	7,567	2,005	3.774
50	3	511	1005,664	13,058	1,959	6.666
50	3	1,173	2220,444	9,408	1,893	4.97
50	3	1,275	2502,130	12,195	1,959	6.225
50	3	1,332	2521,420	9,480	1,893	5.008

Tabelle A.2: Daten der DAQ mit digitaler Elektronik

Abstand [mm]	Kristall	Energie [keV]	Channel	FWHM [ch]	Steigung	FWHM [keV]
0	0	511	1,976	9.5	3.863	5.791
0	0	1,173	4,512.56	6.2	3.859	3.783
0	0	1,275	4,927	8.7	3.863	5.303
0	0	1,332	5,126.2	6.295	3.859	3.841
0	1	511	2,016	9.5	3.936	5.684
0	1	1,173	4,609.76	4.913	3.941	2.936
0	1	1,275	5,023	8.8	3.936	5.265
0	1	1,332	5,236.36	5.01	3.941	2.994
0	2	511	2,106	9.3	4.111	5.327
0	2	1,173	4,816.25	4.927	4.115	2.819
0	2	1,275	5,247	8	4.111	4.582
0	2	1,332	5,470.49	5.065	4.115	2.898
0	3	511	2,406	13.7	4.767	6.768
0	3	1,173	5,541.36	9.21	4.776	4.541
0	3	1,275	6,048	12.4	4.767	6.125
0	3	1,332	6,300.77	9.307	4.776	4.589
10	0	511	1,966.32	11.52	3.849	7.048
10	0	1,173	4,511.94	9.142	3.854	5.586
10	0	1,275	4,906.85	9.893	3.849	6.052
10	0	1,332	5,125.34	9.368	3.854	5.724
10	1	511	2,010.79	8.787	3.933	5.261
10	1	1,173	4,605.91	5.378	3.937	3.217
10	1	1,275	5,015.23	7.99	3.933	4.784
10	1	1,332	5,231.91	5.452	3.937	3.261
10	2	511	2,099.28	9.027	4.105	5.178
10	2	1,173	4,808.25	5.303	4.109	3.039
10	2	1,275	5,235.3	7.893	4.105	4.528
10	2	1,332	5,461.64	5.395	4.109	3.092
10	3	511	2,396.3	12.93	4.759	6.398
10	3	1,173				
10	3	1,275	6,032.33	12.11	4.759	5.992
10	3	1,332				
20	0	511	1,965.03	10.59	3.851	6.476
20	0	1,173	4,509.39	6.465	3.856	3.948
20	0	1,275	4,906.85	9.332	3.851	5.706
20	0	1,332	5,122.57	6.673	3.856	4.075
20	1	511	2,008.07	7.853	3.932	4.703
20	1	1,173	4,608.55	4.908	3.94	2.933

Tabelle A.2: Daten der DAQ mit digitaler Elektronik

Abstand [mm]	Kristall	Energie [keV]	Channel	FWHM [ch]	Steigung	FWHM [keV]
20	1	1,275	5,012.22	6.624	3.932	3.967
20	1	1,332	5,235	4.965	3.94	2.967
20	2	511	2,096.76	8.371	4.105	4.802
20	2	1,173	4,814.58	4.937	4.115	2.825
20	2	1,275	5,232.65	7.001	4.105	4.016
20	2	1,332	5,468.83	5.049	4.115	2.889
20	3	511	2,386.03	12.27	4.747	6.087
20	3	1,173	5,541.33	9.168	4.777	4.519
20	3	1,275	6,012.66	11.26	4.747	5.586
20	3	1,332	6,300.82	9.162	4.777	4.516
30	0	511	1,963.82	10.21	3.849	6.246
30	0	1,173	4,514.54	6.144	3.861	3.747
30	0	1,275	4,904.77	9.512	3.849	5.819
30	0	1,332	5,128.43	6.291	3.861	3.837
30	1	511	2,006.79	7.467	3.932	4.472
30	1	1,173	4,609.18	4.867	3.941	2.908
30	1	1,275	5,010.84	6.453	3.932	3.865
30	1	1,332	5,235.74	4.972	3.941	2.971
30	2	511				
30	2	1,173	4,815.56	4.898	4.115	2.803
30	2	1,275				
30	2	1,332	5,469.83	5.047	4.115	2.888
30	3	511	2,381.9	12.3	4.743	6.107
30	3	1,173	5,537.69	9.278	4.773	4.577
30	3	1,275	6,005.18	11.64	4.743	5.779
30	3	1,332	6,296.52	9.392	4.773	4.634
40	0	511	1,962.7	9.483	3.849	5.802
40	0	1,173	4,516.25	6.568	3.862	4.005
40	0	1,275	4,903.35	8.992	3.849	5.501
40	0	1,332	5,130.38	6.629	3.862	4.042
40	1	511	2,005.64	7.225	3.931	4.328
40	1	1,173	4,610.88	4.92	3.942	2.939
40	1	1,275	5,009.28	6.07	3.931	3.636
40	1	1,332	5,237.6	5.008	3.942	2.992
40	2	511	2,093.98	7.149	4.104	4.102
40	2	1,173	4,815.38	4.989	4.115	2.855
40	2	1,275	5,229.27	6.001	4.104	3.443
40	2	1,332	5,469.59	5.074	4.115	2.904
40	3	511	2,377.41	12.26	4.738	6.093
40	3	1,173	5,545.31	9.063	4.779	4.466
40	3	1,275	5,997.23	11.24	4.738	5.586
40	3	1,332	6,305.12	9.129	4.779	4.498
50	0	511	1,961.66	9.335	3.849	5.711
50	0	1,173	4,513.98	6.156	3.861	3.755
50	0	1,275	4,902.02	8.409	3.849	5.145
50	0	1,332	5,127.83	6.256	3.861	3.815
50	1	511	2,004.78	6.914	3.932	4.141
50	1	1,173	4,609.48	4.896	3.941	2.925
50	1	1,275	5,008.55	5.818	3.932	3.484

Tabelle A.2: Daten der DAQ mit digitaler Elektronik

Abstand [mm]	Kristall	Energie [keV]	Channel	FWHM [ch]	Steigung	FWHM [keV]
50	1	1,332	5,236.04	4.955	3.941	2.961
50	2	511	2,093.17	6.952	4.103	3.99
50	2	1,173	4,814.68	4.918	4.115	2.814
50	2	1,275	5,228.23	5.675	4.103	3.257
50	2	1,332	5,468.94	5.009	4.115	2.866
50	3	511	2,369.58	13.26	4.726	6.607
50	3	1,173	5,536.42	9.289	4.77	4.586
50	3	1,275	5,979.88	12.49	4.726	6.223
50	3	1,332	6,294.9	9.533	4.77	4.706

Danksagung

Hiermit möchte ich folgenden Leuten meinen Dank für die geleistete Unterstützung beim Erstellen meiner Bachelor Arbeit aussprechen:

Rene Reifarth für die Ermöglichung dieser Arbeit und die kritische Betrachtung der erhaltenen Messwerte.

Kerstin Sonnabend für die Erklärungen der Funktionsweise der analogen Module zur Datenauswertung, sowie die Fehlersuche, falls diese nicht die gewünschten Ergebnisse produzierten.

Kathrin Göbel für Anmerkungen und Korrekturen dieser Arbeit.

Konstantin Landwehr für den gemeinsamen Aufbau des Detektor und der DAQ, sowie die Hilfe bei den in Latex zu verwendenden Paketen und Befehlen.

Stefan Schmidt für die Inbetriebnahme des Digitizers und Einführung in den Umgang mit diesem.

Herrn Rodrian für das Füllen der Kannen mit flüssigen Stickstoff.

Meinen Eltern, ohne die ich aus vielen Gründen diese Arbeit nicht hätte schreiben können.