



TUM SCHOOL OF NATURAL SCIENCES

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Bachelorarbeit im Fach Physik

**Softwaregesteuerte Mehrbereichs-Kalibrierung
des CALIFA-Kalorimeters im R3B-Experiment**

**Computer-Controlled Multi-Range Calibration for
the CALIFA Calorimeter of R3B**

Autor: Gero Bollmann
Themenstellerin: Prof. Dr. Laura Fabbietti
Betreuer: Dr. Roman Gernhäuser
Abgabedatum: 23. Dezember 2024



Zusammenfassung

Das Kalorimeter CALIFA des R3B-Experiments dient der Detektion von Gamma-Strahlung und geladenen Teilchen und verfügt über zwei Detektionsbereiche mit unterschiedlicher Signalverstärkung. Diese Konfiguration ermöglicht eine bessere Energieauflösung über den gesamten Bereich und gleichzeitig eine höhere Effizienz bei niedrigen Energien. CALIFA umfasst mittlerweile mehr als 1500 aktive Detektorelemente und über 2300 Auslesekanäle. Aufgrund der vielfältigen und im Laufe der Jahre leicht variierenden Produktionszyklen der Elektronikkomponenten sind systematische Tests essenziell, um die Leistungsfähigkeit des Systems zu gewährleisten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Kalibrierung mithilfe von radioaktiven Quellen zusammen mit einem elektronischen Pulser durchgeführt und eine automatisierte Kalibrationssoftware entwickelt. Diese ermöglicht die präzise Kalibrierung des Hochenergiebereichs durch Extrapolation aus dem Niederenergiebereich. Mithilfe der Ergebnisse wurden die Verstärkungseinstellungen bewertet, wobei fehlerhafte Einstellungen und defekte Komponenten erfolgreich identifiziert und lokalisiert werden konnten. Zudem konnte die Linearität der Elektronikkette nachgewiesen werden.

Das Softwarepaket bildet eine wichtige Grundlage für zukünftige Streuexperimente und wurde so konzipiert, dass es bei Änderungen des Detektors ohne Anpassungen erneut eingesetzt werden kann. Darüber hinaus lässt es sich erweitern, beispielsweise zur Automatisierung der Gain-Kalibrierung, welche die optimale Spannungseinstellung der Avalanche-Photodioden ermöglicht.

Abstract

The CALIFA calorimeter of the R3B experiment is designed to detect gamma radiation and charged particles, featuring two detection ranges with different signal amplification. This configuration allows for improved energy resolution across the entire range while simultaneously achieving higher efficiency at low energies. CALIFA now consists of more than 1500 active detector elements and over 2300 readout channels. Due to the diverse and slightly varying production cycles of electronic components over the years, systematic testing is essential to ensure the system's performance.

In this work, a calibration process was performed using radioactive sources in combination with an electronic pulser, and an automated software tool was developed. This tool facilitates the precise calibration of the high-energy range by extrapolating from the low-energy range. Based on the results, the gain settings were evaluated, and incorrect configurations and defective components were successfully identified and localized. Additionally, the linearity of the electronic chain was validated.

The implemented software package provides an important foundation for future scattering experiments and has been designed to be reused without modifications in case of detector upgrades. Furthermore, it can be extended to include features such as automating the gain calibration, which optimizes the voltage settings of the avalanche photodiodes.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Aufbau des Experiments	2
2.1 GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH	2
2.1.1 R3B-Experiment	3
2.2 CALIFA-Kalorimeter	4
2.2.1 Aufbau	4
2.2.2 Detektorelemente	5
2.2.3 APD-Stufe	5
2.2.4 Integrator-Stufe	7
2.2.5 Gain-Stufe	7
2.2.6 Szintillator	8
2.2.7 LAAPD	11
2.3 Energiekalibrierung	12
2.3.1 Energiekalibrierung von CALIFA	12
2.3.2 ^{22}Na -Quelle	14
3 Praktischer Teil	16
3.1 Status von CALIFA	16
3.2 Messaufbau	17
3.3 Software-Implementierung der Kalibrationsroutine	21
4 Analyse und Diskussion	25
4.1 Auswahl der Referenzsignale und Bestimmung der Mittelwerte	25
4.2 Kalibrierung des Gamma-Bereichs	29
4.3 Kalibrierung des Proton-Bereichs	33
4.4 Überprüfung der Linearität des Pulsers	38
4.5 Range-Faktor	39
4.6 Herausforderungen bei der Kalibrierung: Analyse spezieller Detektorelemente	43
5 Fazit	48

1 Einleitung

Seit der Gründung im Jahr 1969 werden am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt physikalische Grundlagen erforscht. Mit der im Bau befindlichen Erweiterung FAIR entsteht eines der weltweit größten Forschungsvorhaben. FAIR wird es ermöglichen, Teilchenstrahlen mit bislang unerreichter Intensität und Qualität zu erzeugen, um unter anderem neue Erkenntnisse über den Aufbau des Universums zu gewinnen.

Im Rahmen des R3B-Experiments, das sich der Untersuchung von Reaktionen mit relativistischen radioaktiven Strahlen widmet, kommen verschiedene hochspezialisierte Detektoren zum Einsatz. Um kinematisch vollständige Messungen durchführen zu können, wird das Kalorimeter CALIFA nahe dem Teilchenstrahl eingesetzt. Dieses wurde entwickelt, um Protonen und Gamma-Strahlung über einen breiten Energiebereich mit guter Effizienz, Winkel- und Energieauflösung zu detektieren.

In den letzten Jahren wurde CALIFA schrittweise aufgebaut und ist mittlerweile zu einem großen Teil funktionsfähig. Für kommende Experimente spielt eine präzise Energiekalibrierung des Detektors eine zentrale Rolle. Bisher wurde die Kalibrierung mithilfe einer radioaktiven Quelle als Referenz durchgeführt, die Gamma-Strahlung mit sehr gut bekannten Energien emittiert. Diese Methode ist jedoch für höhere Energien, wie beispielsweise Protonenenergien bis zu 300 MeV, ungeeignet, da die Referenzwerte mit etwa 1 MeV deutlich unterhalb des zu untersuchenden Energiebereichs liegen.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Untersuchung einer verbesserten Kalibrierungsmethode mithilfe einer Kombination elektronischer Pulser. Dazu haben wir Messungen am CALIFA-Kalorimeter durchgeführt und ein Softwarepaket entwickelt, das den Prozess automatisiert. Dieses Programm spart nicht nur Zeit bei zukünftigen Anpassungen oder Erweiterungen des Detektors, sondern dient auch der Qualitätskontrolle, um fehlerhafte Komponenten zu identifizieren und zu lokalisieren.

2 Aufbau des Experiments

2.1 GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Das GSI Helmholtzzentrum in Darmstadt zählt zu den weltweit führenden Forschungseinrichtungen im Bereich der Schwerionenforschung. Die bestehende Anlage bietet umfangreiche Möglichkeiten für Experimente in der Kern-, Teilchen- und Atomphysik sowie in der Plasmaphysik und Materialwissenschaft. Zu den herausragenden Leistungen zählen die Entdeckung neuer chemischer Elemente und der Einsatz von schweren Ionen in der Krebstherapie. [1]

Die Forschungsinfrastruktur wird derzeit durch die FAIR-Anlage (Facility for Antiproton and Ion Research) erheblich erweitert. Ein zentrales Element dieser Anlage ist der Ringbeschleuniger SIS100, der in einem unterirdischen Tunnel mit einem Umfang von 1100 Metern verläuft. Mit seiner Hilfe können Ionen aller stabilen Isotope der Nuklidkarte auf bis zu 99% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Dafür kommen supraleitende Magnete zum Einsatz, die die Teilchen präzise auf ihrer Bahn führen. Die beschleunigten Ionen stehen entweder direkt für Experimente zur Verfügung oder werden zur Produktion sekundärer Teilchen genutzt. Abbildung 1 zeigt die bestehende GSI-Anlage (blau) sowie die Erweiterung (rot). [2]

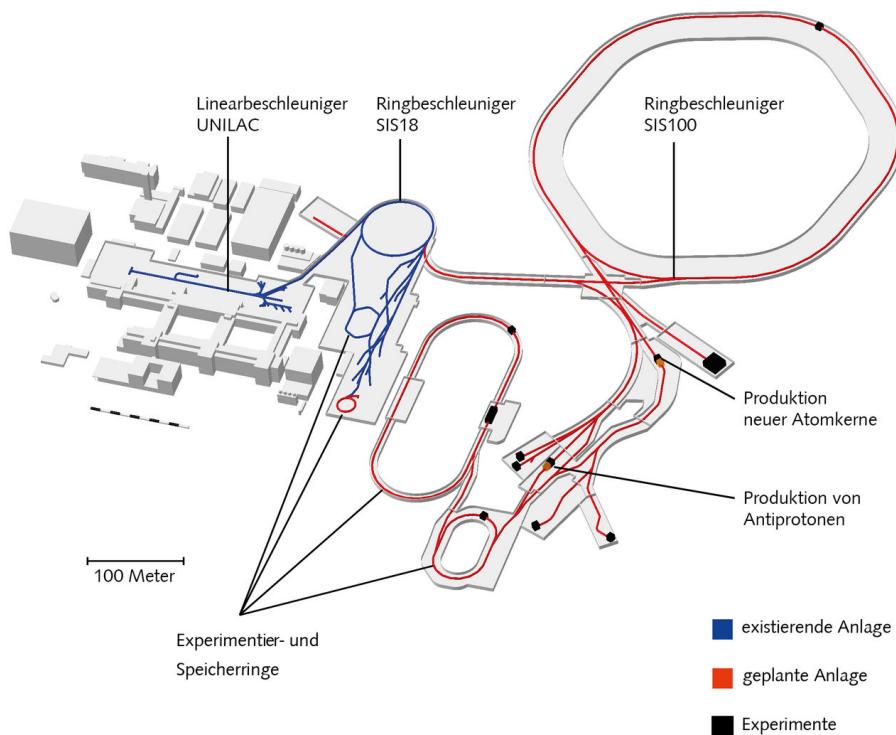


Abbildung 1: Beschleunigeranlagen von FAIR und GSI [3]

2.1.1 R3B-Experiment

Das R3B-Experiment (Reactions with Relativistic Radioactive Beams) ist ein Fixed-Target-Experiment, das derzeit an der GSI durchgeführt wird und nach Fertigstellung der FAIR-Anlage dorthin verlagert werden soll. Ziel des Experiments ist die Untersuchung von Kernreaktionen mit radioaktiven Strahlen bei relativistischen Energien. Dazu werden hochenergetische Strahlen auf ein stationäres Target gerichtet, um die entstehenden Reaktionsprodukte zu analysieren. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Erforschung kurzlebiger, exotischer Kerne, die durch die inverse Kinematik hier sehr effizient untersucht werden können. [4]

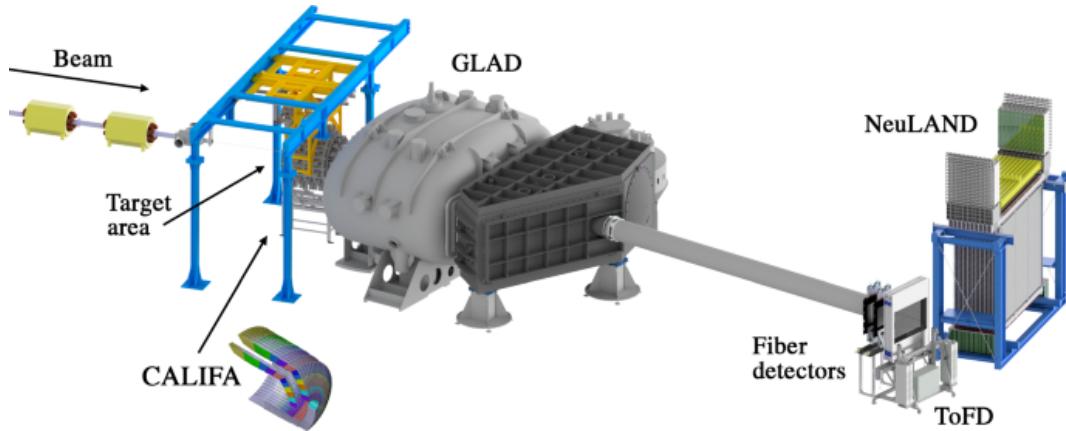


Abbildung 2: Aufbau des R3B-Experiments [5]

Der Aufbau umfasst mehrere spezialisierte Detektoren (siehe Abbildung 2), die eine vollständige kinematische Erfassung der Reaktionsprozesse ermöglichen. Zu den wichtigsten Detektoren gehören:

- **NeuLAND (New Large-Area Neutron Detector):** NeuLAND ist ein großflächiger Neutronendetektor, der speziell für die Detektion schneller Neutronen konzipiert wurde. Er besteht aus Schichten von Szintillatormaterial, die eine präzise Bestimmung von Zeit und Energie der Neutronen erlauben. Zudem ist NeuLAND in der Lage, mehrere Neutronen gleichzeitig zu detektieren. [6]
- **GLAD (GSI Large-Acceptance Dipole):** GLAD ist ein supraleitender Dipolmagnet mit einem großen Akzeptanzwinkel, der geladene Reaktionsprodukte im Magnetfeld ablenkt. Diese Ablenkung ermöglicht in Kombination mit Detektoren wie der TOFD-Wand und Energiedetektoren die präzise Bestimmung von Masse und Impuls der Teilchen. [7]

- **CALIFA (CALorimeter for In Flight detection of γ -rays and high energy charged pArticles):** CALIFA ist das zentrale Gamma-Spektrometer des R3B-Experiments. Das hochauflösende Kalorimeter ist in einem zylindrischen Muster um das Target angeordnet und dient der Messung von Energie und Richtung emittierter Photonen sowie geladener Teilchen. Es zeichnet sich durch eine hohe Effizienz und Winkelauflösung aus. [8]
- **TOFD (Time-Of-Flight Detector):** Die TOFD-Wand misst die Flugzeit der Reaktionsfragmente vom Target bis zum Detektor. Diese Daten sind essenziell für die Berechnung von Geschwindigkeit und Masse der Teilchen und ergänzen die Impulsanalyse. [9]

Nach der Verlagerung zu FAIR wird das R3B-Experiment von der gesteigerten Strahlintensität und Qualität profitieren, was eine höhere Präzision und eine größere Vielfalt an Experimenten ermöglicht.

2.2 CALIFA-Kalorimeter

2.2.1 Aufbau

Das Kalorimeter CALIFA besteht aus einer Vielzahl von Detektorelementen, die wie in Abbildung 3 dargestellt in einem zylindrischen Muster um den Wechselwirkungspunkt herum angeordnet sind. Diese Anordnung dient dazu, einen möglichst großen Winkelbereich mit hoher Winkelauflösung zur Erfassung von Photonen und geladenen Teilchen abzudecken, die bei Reaktionen im Target entstehen. Technische Details können in [10] und [11] nachgelesen werden.

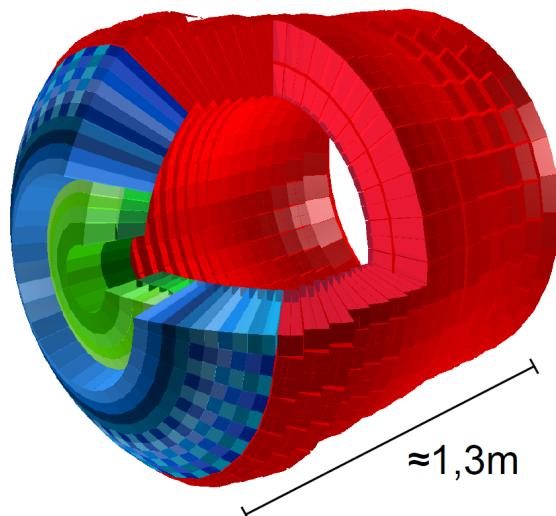


Abbildung 3: Anordnung der CALIFA-Detektorelemente: Der Strahl bewegt sich von rechts hinten nach links vorne. Die einzelnen Bereiche sind farblich gekennzeichnet: CEPA (grün), IPhos (blau) und Barrel (rot). (Bildquelle: Patrick Remmels, TUM)

Die Detektorelemente in CALIFA sind in verschiedenen Winkelsegmenten um den Strahl angeordnet, wobei die Einteilung abhängig vom Polarwinkel erfolgt:

- **Barrel:** Die zylindrische Hauptstruktur von CALIFA deckt einen Winkelbereich von 43° bis 140° ab. Sie besteht aus CsI(Tl)-Detektoren, die sich durch eine hohe Lichtausbeute und präzise Energieauflösung auszeichnen.
- **IPhos:** Der Bereich zwischen 19° und 43° wird von den IPhos-Detektoren abgedeckt, die ebenfalls CsI(Tl)-Kristalle verwenden.
- **CEPA** (Central Endcap Array): Ursprünglich war der Bereich von 7° bis 19° als Phoswich-Detektor aus LaBr₃- und LaCl₃-Kristallen geplant. Da diese Kombination in der vorliegenden Geometrie eine deutlich schlechtere Auflösung als in den Prototypstudien ergab, wurde auch dieser Teil des Detektors zunächst mit CsI(Tl)-Detektoren ausgestattet.

2.2.2 Detektorelemente

Jedes einzelne Detektorelement besteht aus einem Szintillationskristall, der an eine Avalanche-Photodiode (APD) gekoppelt ist, um das erzeugte Licht in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Zur Verstärkung werden die Signale mehrerer Detektorelemente in Gruppen an ein Vorverstärkermodul weitergeleitet, das insgesamt 16 separate Verstärkerkanäle beherbergt. Alle Kanäle aus einem Vorverstärker sind wiederum an ein FEBEX3B-Modul (Front End Board with optical link EXtension, dritte Generation, Version b) angeschlossen, das die Signale digitalisiert und zum Datenakquisitionssystem (DAQ: Data AcQuisition system) weiterleitet. Das DAQ-System erfasst und speichert die digitalisierten Daten zur weiteren Analyse.

In Abbildung 4 ist ein vereinfachter Schaltplan eines Vorverstärkermoduls dargestellt, der den Signalverarbeitungsweg illustriert. Dieser gliedert sich in drei Bereiche: APD-Stufe, Integrator-Stufe und Gain-Stufe.

2.2.3 APD-Stufe

Im orange markierten Bereich der Abbildung 4 ist das Ersatzschaltbild einer Avalanche-Photodiode zu sehen. Die zeitabhängige Signalkurve L(t) (siehe Gleichung 1) stellt im Folgenden das elektrische Signal aus der Photodiode dar. HV_{APD} bezeichnet die Betriebsspannung der APD, welche den Lawineneffekt auslöst und dadurch eine Signalverstärkung bewirkt. Widerstände in der Schaltung dienen dabei als Strombegrenzung, um die Bauteile vor übermäßigen Strömen zu schützen und gleichzeitig zur Spannungsstabilisierung, um eine konstante Verstärkung des Signals sicherzustellen.

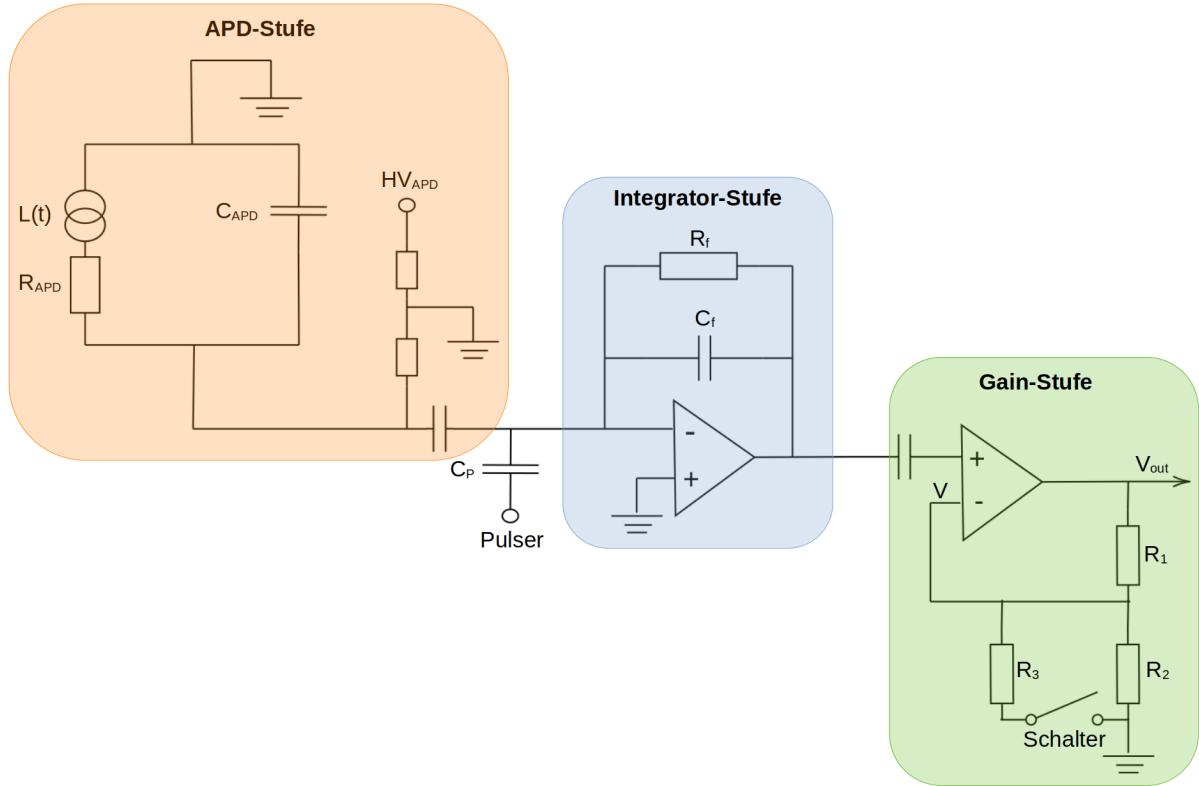


Abbildung 4: Ersatzschaltbild eines Detektormoduls

Zusätzlich ermöglicht der Koppelkondensator C_{Pulser} das Einspeisen eines elektrischen Pulser-Signals, das das Ausgangssignal der APD-Stufe nachbilden soll. Dieses Pulser-Signal kann, wie später erläutert wird, zur Kalibrierung des Detektors verwendet werden. Der Koppelkondensator sorgt dafür, dass bei einer eingekoppelten Spannung eine definierte Ladungsmenge an den Verstärker weitergeleitet wird.

Abhängigkeiten von $L(t)$

Das elektrische Signal $L(t)$ hängt von mehreren Faktoren ab [12, Kapitel 4, 8 und 9]:

$$L(t) \equiv f(N_\gamma \cdot c_{\text{Transp.}} \cdot c_{\text{Absorp.}} \cdot \epsilon_{\text{APD}} \cdot g_{\text{APD}}) \quad (1)$$

- N_γ : Anzahl der im Szintillator erzeugten Photonen, abhängig von der Energie des einfallenden Teilchens und der Lichtausbeute des Materials
- $c_{\text{Transp.}}$: Effizienz des Photonentransports durch den Szintillator, beeinflusst durch Materialeigenschaften, Oberfläche, Reflektor und Geometrie
- $c_{\text{Absorp.}}$: Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon in der APD absorbiert wird

- ϵ_{APD} : Quanteneffizienz der APD, beschreibt den Anteil der absorbierten Photonen, die in Elektronen-Loch-Paare umgewandelt werden
- g_{APD} : Verstärkung des elektrischen Signals durch den Avalanche-Effekt innerhalb der APD

Die gesamte Lichtausbeute $\int L(t) dt$ hängt sowohl von der im Szintillationskristall deponierten Energie als auch von der Teilchensorte ab. Photonen deponieren ihre Energie durch Prozesse wie Compton-Streuung, Photoeffekt oder Paarbildung. Dabei wird jeweils ein erheblicher Teil der Gesamtenergie in einem ersten Schritt auf ein einzelnes oder wenige Elektronen übertragen.

Schwere, geladene Teilchen wie Protonen deponieren ihre Energie hingegen hauptsächlich durch Ionisation und Anregung von Molekülen entlang ihrer Bahn. Aufgrund ihrer hohen Ionisationsdichte kann bei diesen Teilchen der sogenannte Quenching-Effekt auftreten. Hierbei führt die dichte Energieabgabe entlang der Teilchenbahn zu Wechselwirkungen zwischen angeregten Zuständen im Kristall. Ein Teil der überschüssigen Energie wird dabei über nicht-strahlende Prozesse, wie Wärme, abgeführt, anstatt zur Emission von Photonen beizutragen. Dies reduziert die Photonenausbeute und damit die Signalstärke.

2.2.4 Integrator-Stufe

In der nächsten Stufe wird das Stromsignal der Avalanche-Photodiode durch einen Verstärker in Integrator-Konfiguration zeitlich integriert, in eine dazu proportionale Spannung umgewandelt und verstärkt.

Der Rückkopplungskondensator C_f sorgt für die Integration des Eingangssignals. Dabei speichert der Kondensator Ladung proportional zum Strom der APD über die Zeit. Die Ausgangsspannung ist somit das zeitliche Integral des Eingangsstroms. Der parallel geschaltete Rückkopplungswiderstand R_f stabilisiert die Schaltung, indem er verhindert, dass die Ausgangsspannung bei Gleichstromsignalen (DC) unkontrolliert ansteigt. Außerdem bewirkt R_f , dass die Schaltung bei niedrigen Frequenzen als Integrator arbeitet und differenziert das Signal kontinuierlich, sodass es wieder die Nulllinie erreicht.

2.2.5 Gain-Stufe

In der Gain-Stufe wird das integrierte Signal aus der vorherigen Stufe weiter verstärkt. Hierzu wird ein Operationsverstärker in einer nicht-invertierenden Konfiguration verwendet. Das Eingangssignal wird an den nicht-invertierenden Eingang des Operationsverstärkers angelegt, während die Verstärkung durch ein Rückkopplungsnetzwerk am invertierenden Eingang bestimmt wird. Die Verstärkung

wird durch das Verhältnis der Widerstände R_1 , R_2 und R_3 im Rückkopplungsnetzwerk festgelegt, die als Spannungsteiler fungieren. [13, Kapitel 1]

Ein Schalter ermöglicht die Auswahl zwischen zwei Verstärkungsstufen. Im ersten Modus ist nur R_2 aktiv, wodurch sich die Verstärkung zu

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2)$$

ergibt. Wird zusätzlich R_3 parallel zu R_2 geschaltet, reduziert sich der Gesamtwiderstand auf

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}, \quad (3)$$

was zu einer höheren Verstärkung führt:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_{\text{ges}}} \right). \quad (4)$$

Die beiden Verstärkungsstufen sind für verschiedene Anwendungsbereiche abgestimmt. Der Modus mit höherer Verstärkung, als **Gamma-Bereich** bezeichnet, ist für die Detektion niederenergetischer Signale, wie sie bei Gammastrahlen auftreten, gedacht. Der Modus mit niedrigerer Verstärkung, der **Proton-Bereich**, eignet sich hingegen für die Erfassung höherer Signale, wie sie bei Protonen auftreten.

In CALIFA kommen sowohl Single Range (SR) als auch Dual Range (DR) Vorverstärker zum Einsatz. Bei SR-Vorverstärkern muss eine der beiden Verstärkungsstufen ausgewählt werden. DR-Vorverstärker hingegen ermöglichen die gleichzeitige Erfassung beider Bereiche, indem das Signal vor der Gain-Stufe aufgeteilt und durch zwei separate Verstärkungsstufen mit unterschiedlicher Verstärkung verarbeitet wird, die jeweils an verschiedene Kanäle der FEBEX-Module zur Digitalisierung weitergegeben werden können. Aufgrund dieser Signalaufteilung sind grundsätzlich die Ausgangsspannungen der DR-Vorverstärker im Vergleich zu den SR-Vorverstärkern bei sonst identischem Netzwerk etwas geringer.

2.2.6 Szintillator

Szintillatoren werden eingesetzt, um die kinetische Energie von geladenen Teilchen und Photonen in detektierbares Licht umzuwandeln. Ein geeignetes Szintillationsmaterial zeichnet sich durch eine hohe Szintillationseffizienz aus, bei der ein möglichst großer Anteil der deponierten Energie in Photonen umgewandelt wird. Darüber hinaus sollte die Lichtausbeute über einen breiten Energiebereich proportional zur deponierten Energie sein, um präzise Messungen zu gewährleisten. Damit das erzeugte Licht effizient detektiert werden kann, muss das Material für die emittierten Wellenlängen

transparent sein, sodass die Photonen ungehindert zum Detektor gelangen. Außerdem sollte die Relaxationszeit des Materials, also die Zeit, die es benötigt, um nach der Anregung in den Grundzustand zurückzukehren und das Licht abzustrahlen, möglichst kurz sein. Eine kurze Relaxationszeit ermöglicht hohe Detektionsraten und minimiert die Signalüberlappung bei schnellen Ereignisfolgen.

Neben der Leistungsfähigkeit des Materials spielen auch wirtschaftliche und praktische Aspekte eine Rolle, insbesondere bei größeren Szintillationsdetektoren. Dazu zählen Faktoren wie Herstellungs-kosten und Betriebsanforderungen, beispielsweise die Notwendigkeit einer speziellen Kühlung. [12, Kapitel 8]

CsI(Tl)-Detektoren

Gegenwärtig ist das gesamte Kalorimeter mit CsI(Tl)-Kristallen ausgestattet, einem Alkalihalogenid Cäsiumjodid, das mit Thallium als Aktivator dotiert ist. Eine besondere Eigenschaft von CsI(Tl) ist die variable Abklingzeit, die von der Art des einfallenden Teilchens abhängt. Dies ermöglicht es, aufgrund der unterschiedlichen Pulsformen zwischen verschiedenen Strahlungsarten zu unterscheiden.

Wechselwirkungen mit Gammastrahlung

Gammastrahlung wechselwirkt im Szintillationsmaterial hauptsächlich über drei Prozesse: die photoelektrische Absorption, die Compton-Streuung und die Paarbildung. [13, Kapitel 2]

Bei der photoelektrischen Absorption gibt das Photon seine gesamte Energie an ein gebundenes Elektron eines Atoms ab. Dieses Elektron wird aus seiner Schale herausgeschlagen und deponiert seine kinetische Energie im umgebenden Material, wodurch das Atom ionisiert wird. Das Auffüllen der entstandenen Elektronenlücke durch ein anderes Elektron führt zur Emission charakteristischer Strahlung. Dieser Prozess tritt bevorzugt bei niedrigen Photonenergien auf und ist in Materialien mit hoher Ordnungszahl Z häufiger.

Die Compton-Streuung beschreibt die elastische Streuung eines Photons an einem Elektron. Dabei gibt das Photon einen Teil seiner Energie an das Elektron ab und ändert gleichzeitig seine Richtung. Die übertragene Energie hängt vom Streuwinkel ab: Bei kleinen Winkeln wird nur wenig Energie übertragen, bei großen Winkeln deutlich mehr. Die Wahrscheinlichkeit für Compton-Streuung steigt mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Elektronen, nimmt jedoch mit steigender Photonenergie ab.

Die Paarbildung tritt bei hohen Energien auf, wenn die Photonenergie die doppelte Ruheenergie des Elektrons (1,022 MeV) übersteigt. Dabei wird das Photon in ein Elektron-Positron-Paar umgewandelt. Dieser Prozess wird bei höheren Energien zunehmend dominant, ist jedoch in Szintillationsdetektoren oft unerwünscht, da das entstehende Positron bei der Annihilation Wechselwirkungen im Detektor verursacht. Dies erschwert die Signalverarbeitung und die Rekonstruktion der ursprünglichen Ereignisse.

Um eine hohe Effizienz bei der Detektion von Gammastrahlen zu erreichen, werden Materialien mit hoher Ordnungszahl wie Cäsiumiodid (CsI) bevorzugt eingesetzt. Diese erhöhen die Wahrscheinlichkeit für photoelektrische Absorption und Compton-Streuung. Abbildung 5 zeigt die energieabhängigen Wirkungsquerschnitte für diese Wechselwirkungen in Natriumiodid. Hierbei ist anzumerken, dass der Bereich der Compton-Streuung problematisch ist, da dort oft Gamma-Quanten aus dem Detektormaterial entkommen und somit nicht ihre vollständige Energie deponieren.

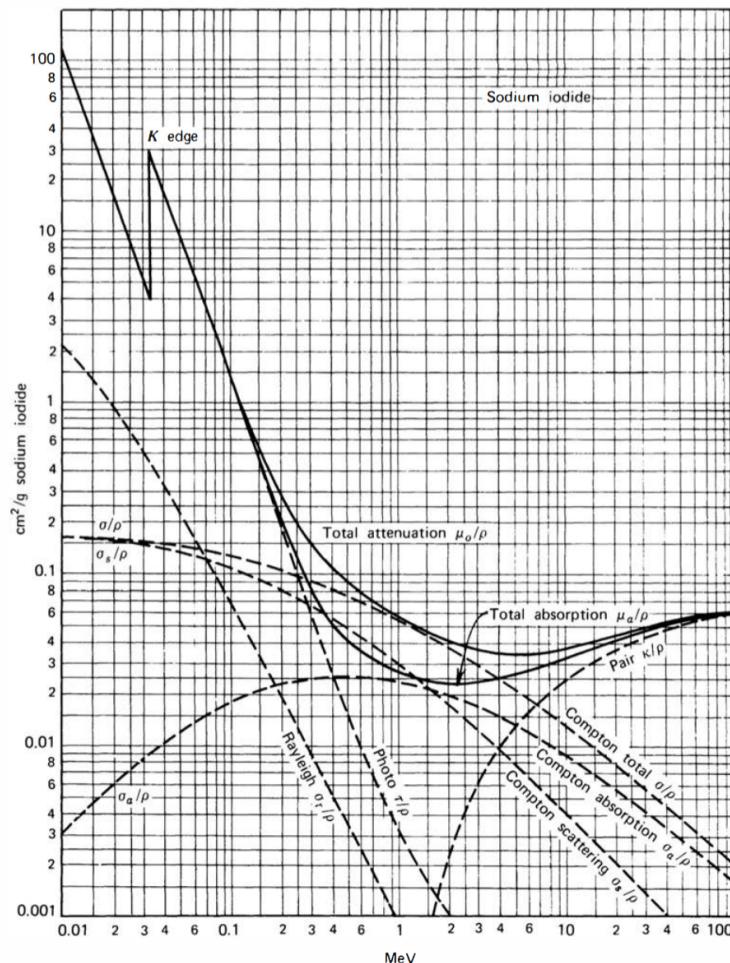


Abbildung 5: Energieabhängigkeit der Wechselwirkungen von Gammastrahlung in Natriumiodid [12, Abbildung 2.18]

Wechselwirkungen mit schweren, geladenen Teilchen

Schwere, geladene Teilchen, wie Protonen, wechselwirken mit Materie hauptsächlich über die Coulombkraft. Dabei übertragen sie Energie auf die Schalenelektronen der Atome, wodurch diese entweder angeregt oder ionisiert werden. Entlang ihrer Bahn interagieren diese Teilchen kontinuierlich mit einer Vielzahl von Elektronen, was zu einem schrittweisen Energieverlust führt. Dieser Prozess bremst das Teilchen so lange ab, bis es schließlich zum Stillstand kommt. [13, Kapitel 2]

Die Energieabgabe pro Wegstrecke wird durch die spezifische Energieverlustrate beschrieben, die sich durch die Bethe-Bloch-Gleichung über weite Bereiche in guter Näherung ausdrücken lässt:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N B, \quad (5)$$

wobei der Parameter B gegeben ist durch

$$B \equiv Z \left[\ln \left(\frac{2m_0 v^2}{I} \right) - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right]. \quad (6)$$

Hierbei ist v die Geschwindigkeit des Teilchens, ze seine Ladung, N die Teilchendichte der Absorberatome, Z deren Ordnungszahl, m_0 die Elektronenruhemasse und I die mittlere Ionisationsenergie des Materials.

Schwere, geladene Teilchen besitzen aufgrund ihrer hohen Ladung eine starke Ionisationsdichte, wodurch sie einen großen Teil ihrer Energie auf engem Raum deponieren. Diese Eigenschaft kann zu Effekten wie Quenching im Szintillator führen, bei dem ein Teil der Energie in nicht-strahlenden Prozessen verloren geht, was die Lichtausbeute verringert.

2.2.7 LAAPD

In CALIFA kommen sogenannte LAAPDs (Large Area Avalanche PhotoDiodes) zum Einsatz, die eine große lichtempfindliche Fläche besitzen. Im Vergleich zu herkömmlichen Photodioden zeichnen sich Avalanche-Photodioden durch eine innere Verstärkung des elektrischen Signals aus. Diese Verstärkung basiert auf dem sogenannten Lawineneffekt.

Bei Lichteinfall erzeugen Photonen in der Halbleiterschicht Elektron-Loch-Paare. Diese Ladungsträger werden durch ein hohes elektrisches Feld im pn-Übergang beschleunigt, wodurch sie bei Kollisionen mit dem Gitter zusätzliche Elektron-Loch-Paare freisetzen. Dieser Prozess, der sich entlang des elektrischen Feldes fortsetzt, führt zu einer lawinenartigen Vermehrung der Ladungsträger.

Dank dieser inneren Verstärkung können LAAPDs auch sehr schwache Lichtsignale erfassen, da das elektrische Signal über das elektronische Rauschniveau angehoben wird. Diese Eigenschaft macht sie besonders geeignet für Szintillationsdetektoren, in denen geringe Lichtmengen präzise gemessen werden müssen. [14]

2.3 Energiekalibrierung

Der Schwerpunkt dieser Bachelorarbeit liegt auf der Energiekalibrierung des CALIFA-Kalorimeters. Ziel der Kalibrierung ist es, die gemessenen Signale in physikalische Energieeinheiten umzurechnen.

Dies ist beispielsweise mit der radioaktiven Quelle ^{22}Na möglich. Dabei dienen die bekannten Gamma-Energien der charakteristischen Linien (siehe Abschnitt 2.3.2) als Referenzwerte. Im gemessenen ^{22}Na -Spektrum können die Energiewerte den Kanalnummern zugeordnet werden. Diese Korrelation wird durch eine lineare Funktion der Form $E(x) = c + m \cdot x$ beschrieben, wobei E die Energie, x die Kanalnummer, m die Steigung und c der y-Achsenabschnitt ist. Mit den Parametern c und m kann das gesamte Spektrum umgerechnet werden.

Die Kalibrierung basiert auf der Annahme, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Kanalnummer und der deponierten Energie besteht. Abbildung 6 illustriert das Kalibrierungsbeispiel mit der ^{22}Na -Quelle und der zugehörigen linearen Anpassung.

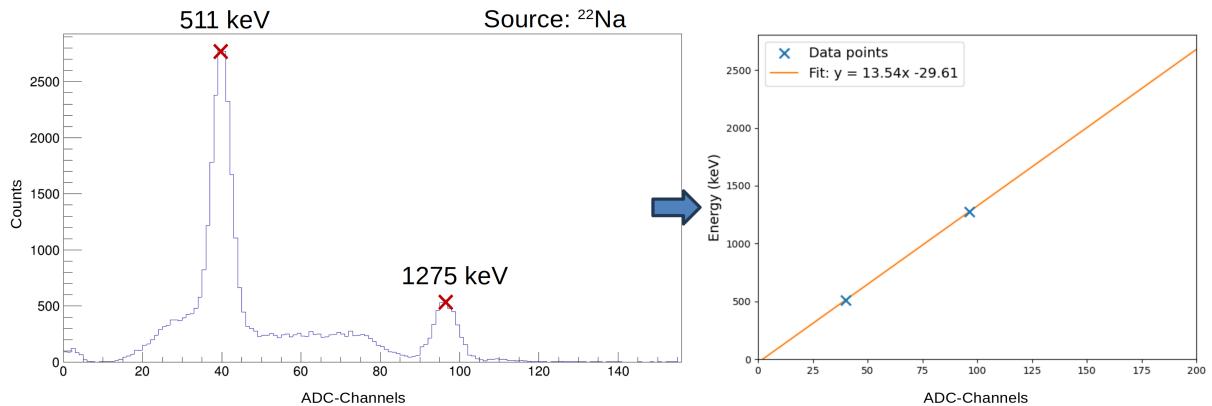


Abbildung 6: Energiekalibrierung mit einer ^{22}Na -Quelle: Lineare Anpassung der Energie an die Kanalnummer

2.3.1 Energiekalibrierung von CALIFA

Diese einfache Kalibrierungsmethode wurde bereits in ersten Tests angewendet. Ein Vergleich der Messungen im Gamma-Bereich (siehe Abbildung 7) und im Proton-Bereich (siehe Abbildung 8) mit einer ^{22}Na -Quelle zeigt jedoch, dass das Zerfallsspektrum im Proton-Bereich kaum sichtbar

ist. Somit ist diese Quelle als Energieriferenz für den Proton-Bereich eher ungeeignet. Um die Kalibrationskurve weit extrapolieren zu können, ist eine äußerst hohe statistische Signifikanz der beiden Messpunkte erforderlich, da die Steigung mit sehr hoher Genauigkeit bestimmt werden muss.

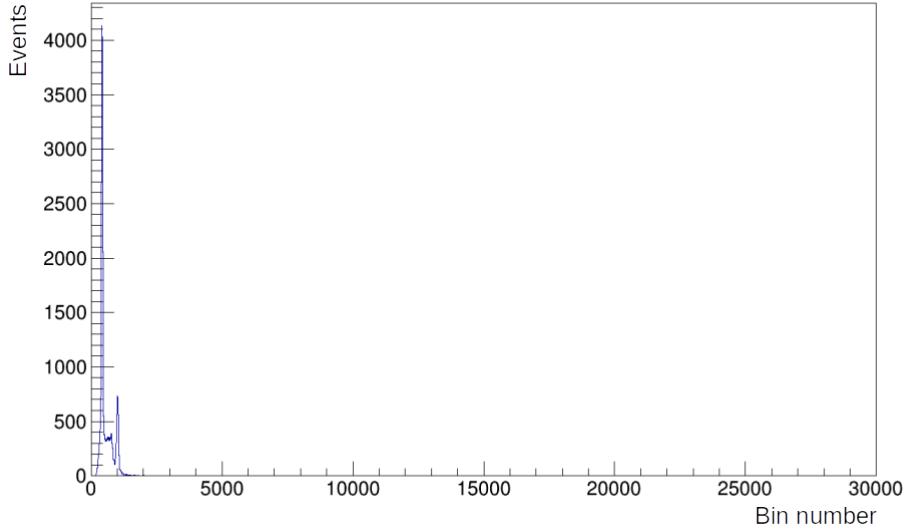


Abbildung 7: Spektrum im Gamma-Bereich mit ^{22}Na -Spektrum

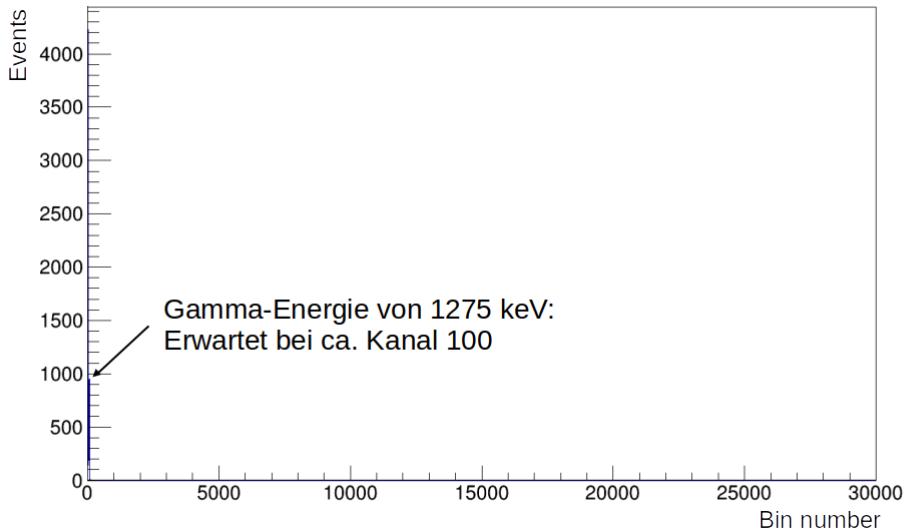


Abbildung 8: Spektrum im Proton-Bereich mit kaum sichtbaren ^{22}Na -Spektrum

Es stellt sich daher die Frage, wie der Proton-Bereich zuverlässig kalibriert werden kann. Eine naheliegende Lösung wäre die Verwendung von Referenzwerten mit höheren Energien. Allerdings gibt es keine praktikable radioaktive Quelle, die Energien um oder über 10 MeV bietet und gleichzeitig eine lange Halbwertszeit, moderate Aktivität und einfache Handhabung vereint.

Elektronischer Pulser

Eine Möglichkeit zur Kalibrierung des Proton-Bereichs besteht in der Verwendung eines elektronischen Pulsers. Dieser wird nach der APD-Stufe über einen Koppelkondensator angeschlossen (siehe Abbildung 4). Ziel des Pulsers ist es, das Signal eines Teilchens nach der APD-Stufe möglichst realistisch zu simulieren.

Dazu werden zunächst Messungen mit hoher Verstärkung, also im Gamma-Bereich, durchgeführt, wobei eine radioaktive Quelle als Energieriferenz dient. Außerdem werden verschiedene Pulser-Signale zugeschaltet. Mithilfe der Quelle kann das Spektrum im Gamma-Bereich kalibriert werden, wodurch die zugehörigen Energien der Pulser-Signale bestimmt werden können.

Nun wechseln wir in den Proton-Bereich, wobei die gleichen Pulser-Signale wie im Gamma-Bereich erneut eingespeist werden. Da die Energien der Pulser-Signale bereits aus der Kalibrierung im Gamma-Bereich bekannt sind, können sie als Energieriferenzwerte zur Kalibrierung des Proton-Spektrums verwendet werden.

Range-Faktor

Eine alternative Methode nutzt den sogenannten Range-Faktor R . Dieser beschreibt das Verstärkungsverhältnis zwischen Gamma- und Proton-Bereich, das durch die unterschiedliche Verstärkung in der Gain-Stufe entsteht. Das Proton-Spektrum kann über die folgende Gleichung kalibriert werden:

$$E(x) = R \cdot (c_\gamma + m_\gamma \cdot x), \quad (7)$$

wobei c_γ und m_γ die Regressionsparameter des Gamma-Spektrums sind. Beide Ansätze werden im weiteren Verlauf der Arbeit detailliert untersucht.

2.3.2 ^{22}Na -Quelle

Das radioaktive Natriumisotop ^{22}Na hat eine Halbwertszeit von 2,6 Jahren und zerfällt über den Beta-Plus-Zerfall unter Aussendung eines Positrons und eines Elektron-Neutrinos in einen angeregten Zustand von ^{22}Ne (siehe Abbildung 9). Dieser geht unter Aussendung eines Gamma-Quants mit einer Energie von 1274,5 keV in den Grundzustand über. [15]

Das ausgesendete Positron kann anschließend mit einem Elektron annihilieren. Dabei hängt der Annihilationsprozess von der Spinkonfiguration der beiden Teilchen ab. Elektron und Positron besitzen jeweils einen Spin von $1/2$, was zwei mögliche Gesamtspin-Zustände erlaubt:

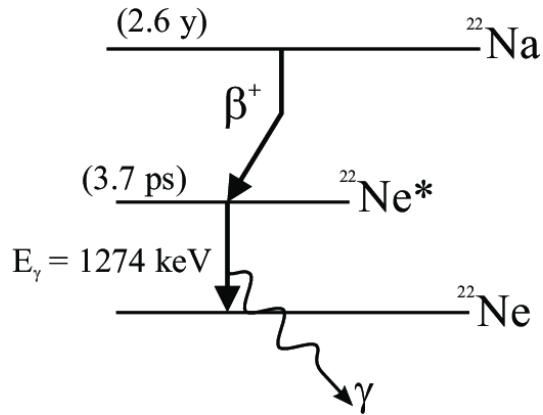


Abbildung 9: Zerfallsschema von ^{22}Na [16]

Im Singulett-Zustand sind die Spins antiparallel ausgerichtet, sodass der Gesamtspin null beträgt. In diesem Fall erfolgt die Annihilation bevorzugt in zwei Gamma-Quanten mit einer Energie von jeweils 511 keV, da dies die einfachste Möglichkeit ist, sowohl Spin- als auch Impulserhaltung zu erfüllen. Die beiden Photonen mit jeweils einem Spin von 1 können antiparallel emittiert werden, wodurch der Gesamtspin des Systems effektiv null bleibt. Gleichzeitig erfolgt die Emission in entgegengesetzten Richtungen, wodurch auch der Gesamtmoment des Systems erhalten bleibt. Diese Konfiguration tritt am häufigsten auf.

Im Triplet-Zustand hingegen sind die Spins der beiden Teilchen parallel ausgerichtet, wodurch der Gesamtspin eins beträgt. Eine Annihilation in zwei Gamma-Quanten ist in diesem Fall nicht möglich, da zwei Photonen keinen Gesamtspin von eins bilden können. Stattdessen kann eine Annihilation in drei Gamma-Quanten erfolgen, bei der die Spins und Emissionsrichtungen den Gesamtspin und den Impuls des Systems ausgleichen. Dieser Prozess ist jedoch ca. 1000 mal langsamer, da er einen deutlich geringeren Wirkungsquerschnitt hat und somit weniger wahrscheinlich ist.

3 Praktischer Teil

Im Zeitraum von Juni bis September 2024 wurden drei Messkampagnen an der GSI durchgeführt, um das CALIFA-Detektorsystem wieder in Betrieb zu nehmen, zu optimieren und die geplanten Messungen durchzuführen.

Zu Beginn wurde das CALIFA-System reaktiviert, wobei Probleme mit dem Datenerfassungssystem (DAQ) behoben und erste Einstellungen optimiert wurden. Erste Pulser-Tests sowie Messungen dienten als Grundlage für die weiteren Arbeiten. Beim nächsten Besuch wurden weitere Pulser, die von der TUM bereitgestellt wurden, getestet, um ein möglichst präzises Signal zu erhalten. Die dabei gewonnenen Messdaten wurden genutzt, um die erste Version der Kalibrierungssoftware zu testen und zu verbessern. Abschließend wurden die finalen Messungen mit dem optimierten Pulser durchgeführt. Auf diesen Daten beruhen alle in dieser Arbeit präsentierten Histogramme und Analysen.

3.1 Status von CALIFA

CALIFA befindet sich derzeit noch im Aufbau. Im Folgenden ist die Konfiguration für die hier diskutierten Messungen dargestellt:

Der Detektor war zum Zeitpunkt der Messung noch nicht vollständig mit Kristallen bestückt. So fehlten die Hälfte der Module in Ring 2 sowie alle Module in Ring 1. Zudem variierte die interne Verkabelung. Darüber hinaus sind noch zahlreiche weitere Komponenten wie Kabel, Konnektoren, Module, und PCs erforderlich, um den Detektor in seiner endgültigen Konfiguration zu vervollständigen.

Die Auswahl der Vorverstärker für die Wixhausen- und Messel-Seite waren identisch. Die Anordnung ist exemplarisch in Abbildung 10 für eine Seite dargestellt. Insgesamt waren folgende Vorverstärker (PA) installiert:

- **CEPA:** 8 x 3/45 pC DR PA
- **IPhos:** 8 x 3/45 pC DR PA, 8 x 3/30 pC DR PA
- **Barrel (Ring 4 + 3):** 32 x 3/30 pC SR PA
- **Backward Barrel (Ring 2):** 16 verschiedene SR/DR PA



Abbildung 10: Schema der verbauten Vorverstärker auf der Wixhausen- und Messel-Seite von CALIFA (Quelle: Tobias Jenegger)

Die Verstärker für das Backward Barrel sind gegenwärtig noch nicht verfügbar, daher wurden hier zunächst verschiedene aus den anderen Detektorbereichen verbaut, was zu einer Mischung aus SR- und DR-Vorverstärkern führte. Allerdings war auch bei den DR-Vorverstärkern pro Messung nur ein einzelner Verstärkungsbereich auslesbar.

Für spätere Analysen sind die Sensitivität der Vorverstärker sowie die Unterscheidung zwischen SR- und DR-Vorverstärkern bedeutend. Diese Eigenschaften beeinflussen das Ausgangssignal und insbesondere den Range-Faktor, der bei der Kalibrierung des Systems eine zentrale Rolle spielt.

3.2 Messaufbau

Für die Messungen wurde eine radioaktive ^{22}Na -Quelle verwendet, die zentral im Detektor positioniert wurde (siehe Abbildung 11). Diese war an einer Schnur befestigt und blieb während allen Messungen im Detektor.

Zusätzlich wurde ein elektronischer Pulser an die Vorverstärker angeschlossen, wobei jeder Vorverstärker über 32 parallel geschaltete Abzweigungen verfügt – jeweils einen für jeden Kanal. Dabei haben die Koppelkondensatoren C_{Pulser} eine geringe Kapazität, sodass das ursprüngliche Signal in der Hauptleitung nahezu unverändert bleibt.

Da die Signallaufzeiten für die Kalibration keinen wesentlichen Einfluss haben, konnten alle Vorverstärker über ein einziges Kabel angeschlossen werden. Allerdings kann die Kapazität der Koppel-



Abbildung 11: Zentrale Positionierung der ^{22}Na -Quelle (in blauer Schutzhülle) im Detektor

kondensatoren bei einer zu großen Anzahl angeschlossener Vorverstärker zu einer Reduktion des Signals entlang der Kette führen. Um diese Signalabnahme zu minimieren, wurden die Messungen separat für die Wixhausen- und die Messel-Seite durchgeführt. Mithilfe eines Oszilloskops wurde überprüft, ob das Signal nach den Vorverstärkern mit dem Anfangssignal übereinstimmt.

Der Anschluss des Pulser-Signals an die Vorverstärker ist in Abbildung 12 auf der rechten Seite dargestellt.



Abbildung 12: SR-Modul mit zwei Vorverstärkern für jeweils 16 Kanäle. Die Eingänge für das Pulserignal befinden sich oberhalb der Adressdecoder. [17]

Für beide Konfigurationen (Pulser an der Wixhausen-Seite und Pulser an der Messel-Seite) wurden mehrere Messungen mit unterschiedlichen Pulser-Spannungen sowohl im Gamma- als auch im Proton-Bereich durchgeführt:

- **Gamma-Bereich:** Pulser-Spannungen von 45, 252 und 425 mV
- **Proton-Bereich:** Pulser-Spannungen von 45, 252, 425, 1300, 3010 und 5620 mV

Die Spannungen wurden über Drehräder am Pulser mit festen Einstellungsstufen sowie mit zuschaltbaren internen Dämpfungsfaktoren von 10 eingestellt, siehe Tabelle 1. Diese Methode gewährleistet eine einfache Wiederholbarkeit der Messungen. Die Spannungen wurden direkt am Pulserausgang über ein Oszilloskop abgelesen, ohne eine Terminierung.

Tabelle 1: Eingestellte Spannungen und zugehörige Pulserkonfigurationen

Spannung [mV]	Drehradeinstellung (groß → klein)	Dämpfungsfaktor
45	6 0 4 0	x10 x10
252	1 2 4 0	-
425	1 4 4 0	-
1300	2 4 4 0	-
3010	4 4 4 0	-
5620	7 4 4 0	-

Die Positionen der ^{22}Na -Linien variieren aufgrund unterschiedlicher Verstärkungen in den APD-Stufen zwischen den einzelnen Kristallen. Da das Pulser-Signal von diesen Schwankungen unbeeinflusst bleibt, wurden die Pulser-Spannungen so eingestellt, dass die Signale der Quelle und des Pulsers für möglichst alle Kristalle klar unterscheidbar sind. Die niedrigste Pulser-Spannung wurde dabei so gewählt, dass das resultierende Signal im Gamma-Bereich bei etwa einer Kanalnummer von 1700 liegt. Alle weiteren Pulser-Signale weisen deutlich höhere Kanalnummern auf.

Zeitlicher Verlauf des Signals

Das Signal eines CsI-Szintillators kann gut als Überlagerung zweier Exponentialfunktionen beschrieben werden, wie in Abbildung 13 dargestellt. Die schnelle Komponente des Signals entsteht durch die Rekombination von Elektronen und Löchern an Aktivierungszentren im Szintillatormaterial. Die langsame Komponente hingegen resultiert aus Rekombinationen von Elektronen, die in Fallen innerhalb des Kristallgitters gefangen wurden. Solche Fallen entstehen beispielsweise durch die Dotierung mit Thallium und befinden sich energetisch knapp unterhalb des Leitungsbandes.

Elektronen verbleiben hier für eine gewisse Zeit, bevor sie thermisch oder durch andere Prozesse freigesetzt und rekombiniert werden.

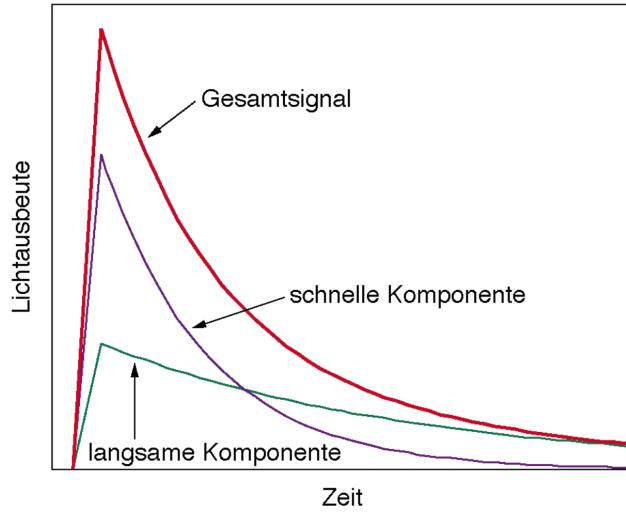


Abbildung 13: Auflösung eines Szintillationssignals in eine schnelle und eine langsame Komponente [18]

Unterschiedliche Teilchensorten regen die schnelle und die langsame Komponente verschieden stark an. Dies ermöglicht die Differenzierung zwischen verschiedenen Teilchensorten durch die sogenannte Pulsshape-Analyse, bei der das Verhältnis zwischen der schnellen und der langsamem Komponente untersucht wird.



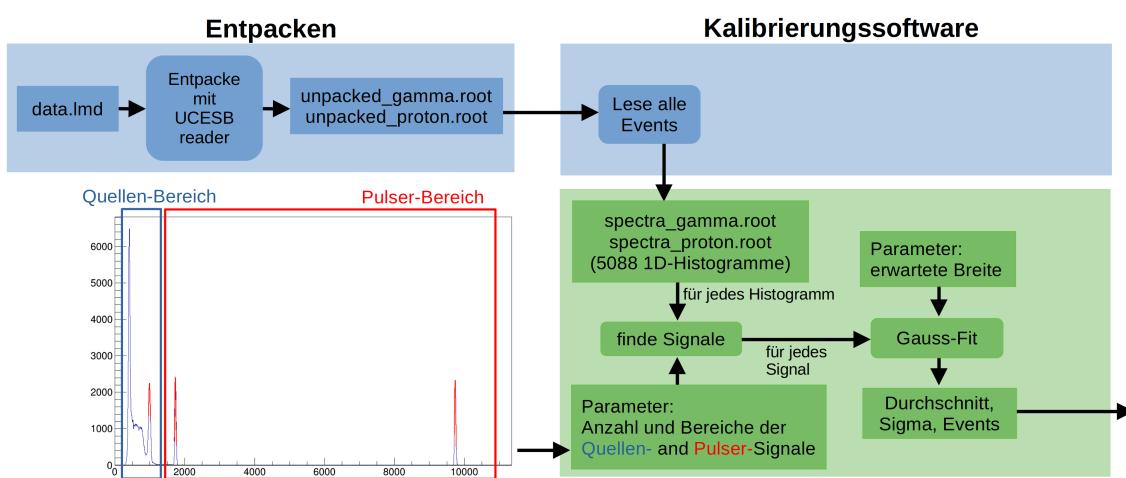
Abbildung 14: Einstellungen des elektronischen Pulsers

Es wurden verschiedene Pulser und deren Einstellungen getestet, um ein Signal zu erzeugen, das die Form eines realen Ereignisses nach der APPD-Stufe möglichst genau nachbildet. Die gewählte Konfiguration, siehe Abbildung 14, führt zu einer Anstiegszeit von wenigen Mikrosekunden, gefolgt von einer langsamen Abfallphase.

3.3 Software-Implementierung der Kalibrationsroutine

CALIFA besteht derzeit aus über 1500 einzelnen Detektorelementen, deren Anzahl mit der weiteren Fertigstellung des Detektors um etwa 814 ansteigt. Aufgrund der baulichen Unterschiede ist eine individuelle Kalibration jedes Elements erforderlich. Um diesen zeitaufwendigen Prozess zu vereinfachen, wurde nach dem ersten Besuch an der GSI eine Kalibrierungssoftware entwickelt. Diese ermöglicht eine automatisierte Durchführung der Kalibration und sorgt für eine effiziente Bestimmung der Regressionsparameter für jeden einzelnen Kristall.

Hierbei sei angemerkt, dass sich die Kalibrierung auf die Energie von Photonen beziehungsweise allgemeiner auf die Lichtausbeute des Szintillationskristalls für Photonen bezieht. Für andere Teilchensorten, wie beispielsweise Protonen, gilt diese Kalibrierung nicht uneingeschränkt. Zusätzliche Messungen sind notwendig, um Effekte wie den Quenching-Effekt zu berücksichtigen, der die Lichtausbeute beeinflussen kann. Ein Überblick über die Funktionsweise des Makros ist in Abbildung 15 dargestellt. Um einen direkten Vergleich zwischen den erwarteten Signalamplituden und den in einem geplanten Streuexperiment gemessenen Signalen zu ermöglichen, sind die hier vorgestellten Entwicklungen essentielle Vorarbeiten.



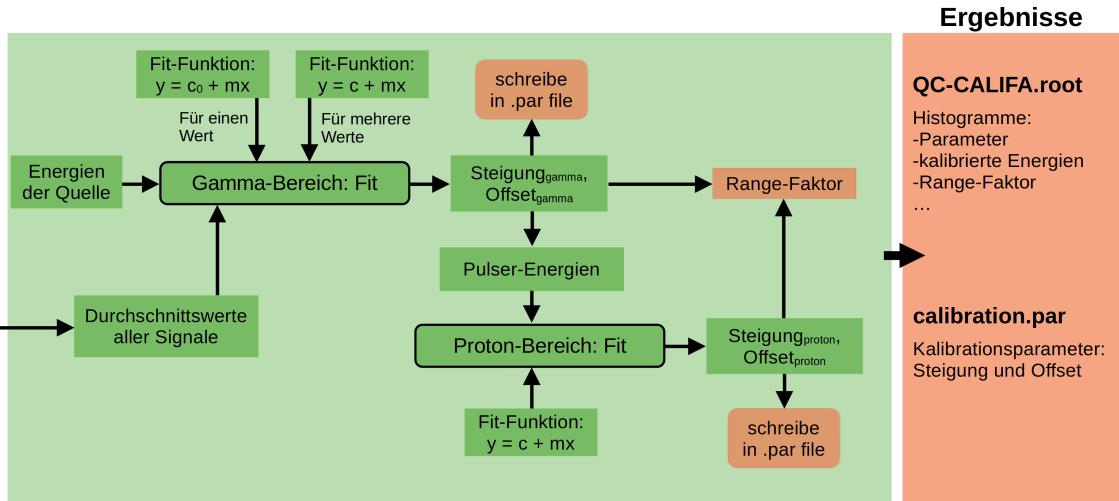


Abbildung 15: Überblick über das Softwarepaket, blau: Datenentpacken, grün: Hauptprogramm, rot: Ergebnisse

Programmablauf

Die Messdaten liegen zunächst im Format `data.lmd` vor und werden mithilfe des UCESB-Readers entpackt. Dabei entstehen die Dateien `unpacked_gamma.root` für die Kanäle im Gamma-Bereich und `unpacked_proton.root` für die Kanäle im Proton-Bereich.

Aus diesen Dateien werden alle Ereignisse extrahiert und in 1D-Histogramme für jeden Kristall gefüllt, nummeriert durch die Crystal-ID. Insgesamt werden 5088 Histogramme erstellt: Die ersten 2544 enthalten alle Kristalle im Gamma-Bereich, wobei einige davon leer sind. Die Histogramme von ID 2545 bis 5088 entsprechen denselben Kristallen, jedoch im Proton-Bereich, wobei ihre Nummern um 2544 verschoben sind.

Die resultierenden Spektren werden in den Dateien `spectra_gamma.root` und `spectra_proton.root` gespeichert. Da das Entpacken und Erstellen der Histogramme mehrere Stunden in Anspruch nimmt, kann dieser Schritt bei erneuten Ausführungen übersprungen werden, indem direkt auf die gespeicherten Spektren zurückgegriffen wird. Dies ermöglicht eine deutlich schnellere Durchführung von Testläufen oder Änderungen an Parametern, da das Hauptprogramm (siehe Abbildung 15, grün) nur wenige Minuten benötigt.

Verarbeitung der Histogramme

Das Hauptprogramm liest die Dateien `spectra_gamma.root` und `spectra_proton.root` ein und verarbeitet die darin enthaltenen Histogramme. Alle nachfolgenden Schritte werden der Reihe nach für jede Crystal-ID ausgeführt, beginnend mit der Crystal-ID 1.

Damit ein Histogramm weiterverarbeitet wird, muss es eine vorgegebene Mindestanzahl an Einträgen aufweisen. Ist dies erfüllt, sucht das Programm nach den ^{22}Na - und Pulser-Signalen. Die korrekte Durchführung dieses Schrittes ist entscheidend, damit die Kalibrierung überhaupt funktionieren kann. Um die Identifikation zu optimieren, wurde die Anzahl der Signale vorgegeben, um beispielsweise zu verhindern, dass Rauschen fälschlicherweise als Signal erkannt wird.

Darüber hinaus wurden spezifische Suchbereiche jeweils für alle Quellen- und Pulser-Signale definiert (siehe Abbildung 15), abhängig davon, ob das Histogramm im Gamma- oder im Proton-Bereich liegt. Diese Einschränkungen sind notwendig, da die Eventanzahl der Quellen-Signale stark zwischen den Kristallen variiert, je nach deren Position relativ zur Quelle. Im Gegensatz dazu weisen die Pulser-Signale über alle Kristalle hinweg eine ähnliche Statistik auf. Es kann daher vorkommen, dass die Signalspitzen der Quelle deutlich höher sind als die des Pulssers. Würde ein einziger Suchbereich für alle Signale verwendet, könnte das Programm fälschlicherweise andere Strukturen, beispielsweise Compton-Kanten im ^{22}Na -Spektrum, als Pulser-Signal identifizieren. Zusätzlich ermöglichen diese das Abschneiden von Rauschen bei niedrigen oder hohen Kanalnummern.

Anpassung der gefundenen Signale an eine Gauß-Funktion

Die identifizierten Signale werden jeweils an eine Gauß-Funktion angepasst, wobei die erwartete Signalbreite vorgegeben ist. Dabei erhalten wir den Mittelwert und die Anzahl der Ereignisse. Liegen diese Werte außerhalb der festgelegten Grenzen, gibt das Programm eine Fehlermeldung aus. Alle verarbeiteten Histogramme einschließlich der Gauß-Kurven werden in der Datei QC-CALIFA.root gespeichert. Zusätzlich werden Histogramme mit allen Parametern erstellt. Dies ermöglicht eine nachträgliche Überprüfung sowie die Identifikation fehlerhafter Signale.

Kalibrierung der Gamma-Spektren

Falls die Crystal-ID kleiner oder gleich 2544 ist und sich das Histogramm somit im Gamma-Bereich befindet, kann die Kalibrierung anhand der ^{22}Na -Linien erfolgen. Hierzu werden die berechneten Mittelwerte verwendet. Eine lineare Regression wird durchgeführt, wobei die x -Werte den Kanalnummern und die y -Werte den bekannten Energien der Signale entsprechen. Dabei bleibt der Offset grundsätzlich variabel; ist jedoch nur ein Referenzwert vorhanden, muss der Offset vorgegeben werden, um die Anpassung durchführen zu können.

Dies liefert die Regressionsparameter Steigung_{gamma} und Offset_{gamma}, die in einer .par-Datei gespeichert werden. Mit diesen Parametern kann die Kanalnummer direkt in Energieeinheiten umgerechnet werden, wodurch das gesamte Gamma-Spektrum kalibriert werden kann. Im Anschluss

lassen sich die Energien der Pulser-Maxima aus dem kalibrierten Spektrum direkt ablesen. Alle Parameter sowie die in Energieeinheiten umgerechneten Mittelwerte werden in Histogrammen gespeichert, um die Durchführung und die Ergebnisse der Kalibrierung später beurteilen zu können. Auf mögliche Fehler und Besonderheiten wird ausführlich in Abschnitt 4.6 eingegangen.

Kalibrierung der Proton-Spektren

Für Crystal-IDs größer als 2544, also für Histogramme im Proton-Bereich, dienen die im Gamma-Bereich zuvor kalibrierten Energien der Pulser-Signale als Energieriferenzwerte (siehe Abschnitt 2.3.1). Zur Kalibrierung werden die drei niedrigsten Pulser-Signale verwendet, anhand derer eine lineare Regression mit variablem Offset durchgeführt wird. Dabei entsprechen die x -Werte den Kanalnummern und die y -Werte den Energien.

Die Regressionsparameter Steigung_{proton} und Offset_{proton} werden analog zur Gamma-Kalibrierung in der .par-Datei und in Histogrammen gespeichert. Mit diesen Parametern kann das gesamte Proton-Spektrum in Energieeinheiten umgerechnet werden. Zusätzlich werden Histogramme für den χ^2 - und den p -Wert erstellt, um die Güte der Regression zu überprüfen.

Die drei höchsten Pulser-Signale werden genutzt, um die Linearität des Pulses zu überprüfen und sicherzustellen, dass die eingestellten Spannungen proportional zu den resultierenden Energien sind (siehe Abschnitt 4.3).

Bestimmung des Range-Faktors

Für zukünftige Anwendungen ist es sinnvoll, den Range-Faktor zu bestimmen. Da es sich um eine feste Konstante handelt, muss er grundsätzlich nur einmalig ermittelt werden. Dieser kann anschließend für die Kalibrierung des Proton-Bereichs verwendet werden (siehe Abschnitt 2.3.1).

Die Bestimmung erfolgt anhand der drei niedrigsten Pulser-Signale, die sowohl im Gamma- als auch im Proton-Bereich sichtbar sind. Dazu wird jeweils das Verhältnis der Kanalnummer im Gamma-Bereich zur entsprechenden Kanalnummer im Proton-Bereich berechnet. Der Mittelwert dieser Verhältnisse ergibt den Range-Faktor. Da die Pulser-Signale sehr scharf sind, sollte die Bestimmung des Range-Faktors mit hoher Präzision erfolgen.

Qualitätssicherung

Zusätzliche Histogramme zur Qualitätssicherung werden erstellt und in der Datei QC-CALIFA.root gespeichert. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt 4 ausführlich erläutert.

4 Analyse und Diskussion

4.1 Auswahl der Referenzsignale und Bestimmung der Mittelwerte

Verwendung beider ^{22}Na -Linien als Referenzwerte

Im ersten Schritt wurde das Programm ausgeführt, wobei beide Linien der verwendeten Quellen berücksichtigt wurden. Dies ist die einfachste Möglichkeit zur Kalibration, da mit 2 Messpunkten beide freien Parameter einer linearen Funktion festgelegt werden können. Es fällt jedoch auf, dass bei vielen Histogrammen das 511-keV-Signal vermutlich leicht abgeschnitten ist, da dieses nicht symmetrisch um das Maximum verteilt ist (siehe Abbildung 16). Dies passiert wahrscheinlich, da der Threshold, ein elektronisches Feature, das nur Signale über einer bestimmten Schwelle zur Verarbeitung zulässt, bei den meisten Kristallen auf etwa 300 eingestellt ist. Der Threshold dient der Unterdrückung von Rauschen und elektronischen Störsignalen.

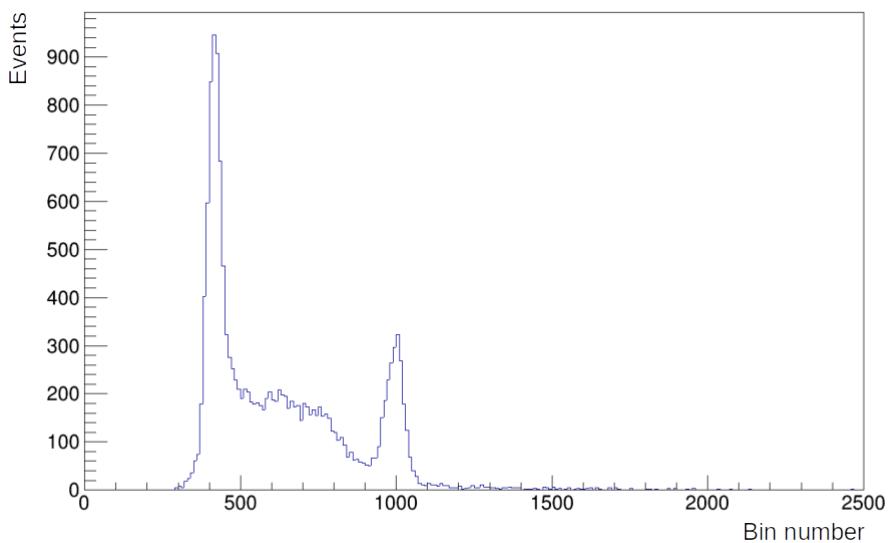


Abbildung 16: ^{22}Na -Spektrum, Crystal-ID 1187

Da die Kanalnummer linear mit der Energie skaliert, sollten bei einem Kristall mit höherem Signal, im Vergleich zu einem anderen Kristall, auch alle anderen Signale dieses Kristalls proportional höher liegen. Entsprechend sollten bei den Mittelwerten der ^{22}Na -Linien in Abbildung 17 ein ähnliches Muster für beide Signale erkennbar sein. Die 1274,5-keV-Linie zeigt ein charakteristisches Treppenmuster, das jedoch beim 511-keV-Signal kaum erkennbar ist. Der untere Teil der Stufen ist abgeschnitten, dementsprechend sind die Mittelwerte nach oben verschoben. Dies deutet darauf hin, dass die unteren Linien teilweise durch den Threshold abgeschnitten wurden.

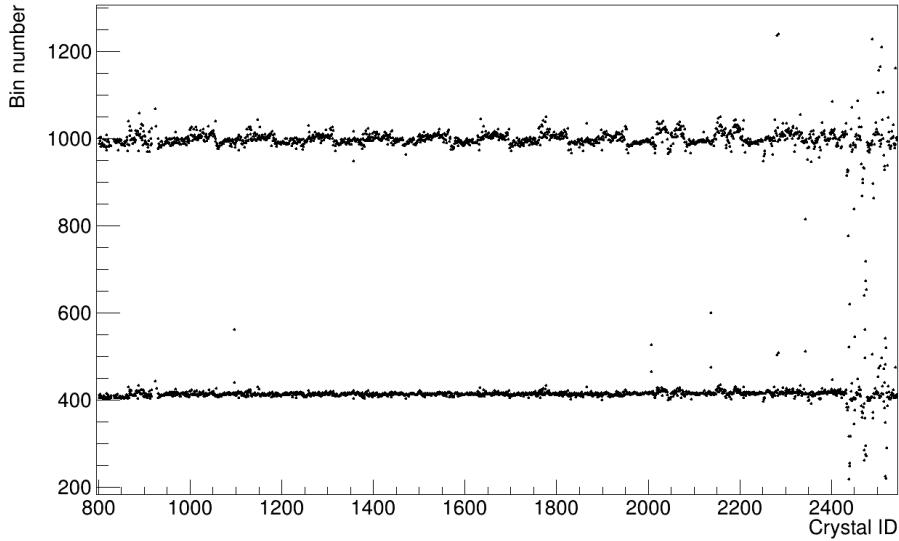


Abbildung 17: Mittelwerte der ^{22}Na -Signale aus allen Histogrammen im Gamma-Bereich

Verwendung der 1274,5-keV-Linie als Referenzwert

Da ein Parameter, der Offset der linearen Kalibrationsfunktion, bedingt durch die Wahl der Datenvorverarbeitung sehr klein sein sollte und auch durch andere Methoden bestimmt werden kann, wurde für die weitere Analyse ausschließlich das 1274,5-keV-Signal verwendet. Nach dem Einlesen der Histogramme, der Signalsuche und dem Anpassen von Gaußkurven wurden insgesamt 3457 1D-Histogramme erstellt. Beispiele für Histogramme aus dem Gamma- und Proton-Bereich mit Pulser-Signalen sind in den Abbildungen 18 und 19 dargestellt. Die roten Kurven sind die angepassten Gaußkurven und dienen zur Überprüfung, ob alle Signale korrekt erkannt wurden.

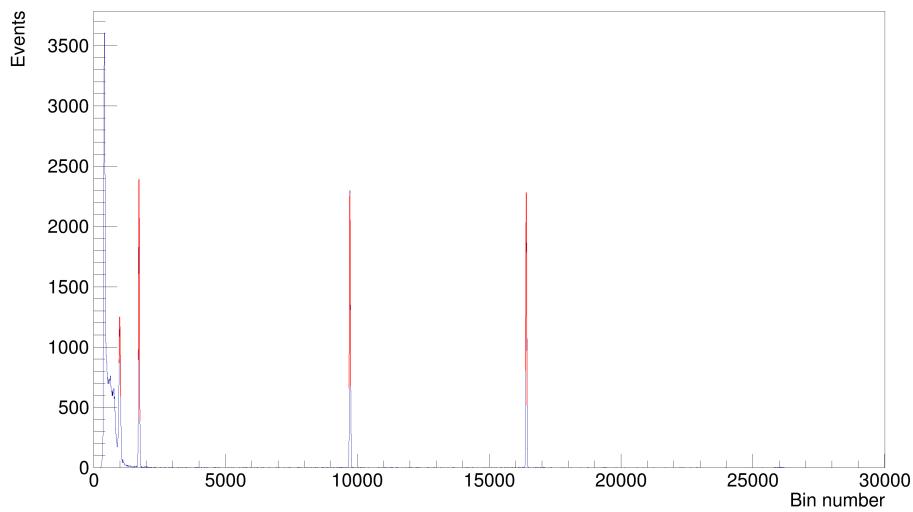


Abbildung 18: Messung im Gamma-Bereich mit angepassten Gaußkurven, Crystal-ID 1480

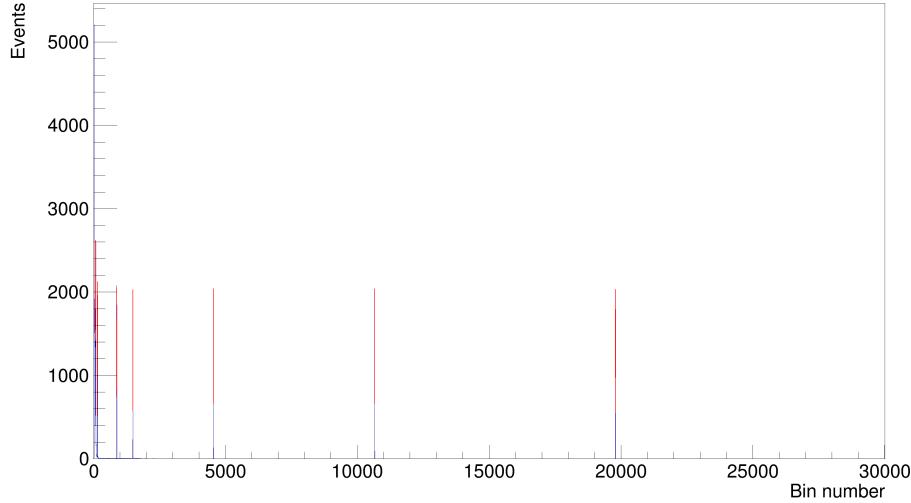


Abbildung 19: Messung im Proton-Bereich mit angepassten Gaußkurven, Crystal-ID 4385

Anschließend wurden die Mittelwerte der Signale für alle Histogramme ermittelt, wie in Abbildung 20 dargestellt. Die Crystal-IDs lassen sich den zuvor beschriebenen Bereichen von CALIFA zuordnen: Blau repräsentiert Back Barrel, Grün Barrel, Gelb IPhos und Orange CEPA.

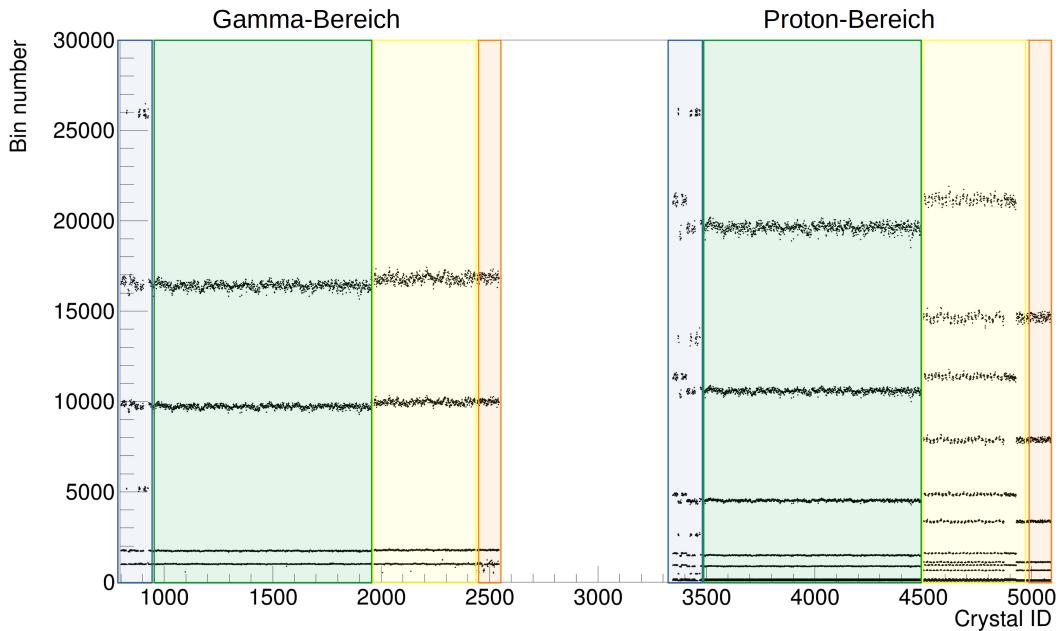


Abbildung 20: Mittelwerte aller gefundenen Energielinien aus beiden Bereichen (blau: Back Barrel, grün: Barrel, gelb: IPhos, orange: CEPA)

Mittelwerte im Gamma-Bereich

Im Gamma-Bereich (Crystal-IDs bis 2544) weisen die Signale jeweils ähnliche Mittelwerte auf, siehe Abbildung 20. Dies liegt daran, dass alle Vorverstärker eine einheitliche Empfindlichkeit von 3 pC besitzen. Während des früheren Gain Matchings – also der Einstellung der Hochspannung an den

LAAPDs zur Angleichung der Verstärkung – wurde darauf geachtet, dass die 1274,5-keV-Linie bei etwa Kanalnummer 1000 liegt, wie auch in Abbildung 17 zu sehen ist.

In den Bereichen mit Dual-Range-Vorverstärkern (in IPhos, CEPA und teilweise Back Barrel) sind die Mittelwerte leicht erhöht. Wie in Abschnitt 2.2.5 erläutert, führt der Dual-Range-Modus im Vergleich zu den Single-Range-Vorverstärkern grundsätzlich zu einer geringeren Gesamtverstärkung, sofern die Komponenten identisch sind. Um dies zu kompensieren, wurde möglicherweise ein höherer Standardwert für die Hochspannung gewählt. Dieser scheint jedoch leicht überkompensiert zu sein, wodurch die Verstärkung geringfügig höher ausfällt als bei den SR-Vorverstärkern. Solche Unterschiede könnten durch eine präzisere Gain-Kalibrierung ausgeglichen werden.

Im Back Barrel treten zudem einige Ausreißer auf. Diese lassen sich darauf zurückführen, dass hier verschiedene Modelle von Vorverstärkern mit unterschiedlichen Empfindlichkeiten verbaut wurden. Da der Bereich noch relativ neu ist, wurde bislang kein vollständiges Gain Matching durchgeführt. Dadurch sind einige Spektren verschoben, was jedoch nicht zwingend als Fehler zu werten ist. In Zukunft sollen die Vorverstärker vereinheitlicht, das Gain Matching optimiert und somit die Ausreißer eliminiert werden.

Mittelwerte im Proton-Bereich

Im Proton-Bereich (Crystal-IDs über 2544) zeigen sich deutliche Unterschiede der Mittelwerte der Signale zwischen den verschiedenen Bereichen. Innerhalb dieser sind die Mittelwerte jedoch größtenteils ähnlich (siehe Abbildung 20), was auf ein gut durchgeführtes Gain Matching hinweist.

Im Back Barrel treten Ausreißer auf, die auf dieselben Ursachen wie im Gamma-Bereich zurückzuführen sind. Im IPhos-Bereich sind Vorverstärker mit Empfindlichkeiten von 30 pC und 45 pC für den Proton-Bereich verbaut, die in Gruppen abwechselnd angeordnet sind (siehe Abbildung 21). Vorverstärker mit einer geringeren Empfindlichkeit von 45 pC (grün) erzeugen aufgrund der geringeren Verstärkung niedrigere Kanalnummern im Vergleich zu den 30 pC-Vorverstärkern (blau). Vergleichen wir die Mittelwerte der 30 pC-Vorverstärker im IPhos-Bereich mit denen im Barrel, so zeigt sich, dass die Mittelwerte im IPhos-Bereich leicht höher liegen. Diese Abweichungen sind, ähnlich wie im Gamma-Bereich, vermutlich auf das Gain Matching zurückzuführen. Im CEPA-Bereich haben die Vorverstärker in der Proton-Einstellung eine Empfindlichkeit von 45 pC. Die gemessenen Werte ähneln denen der 45 pC-Vorverstärker im IPhos-Bereich.

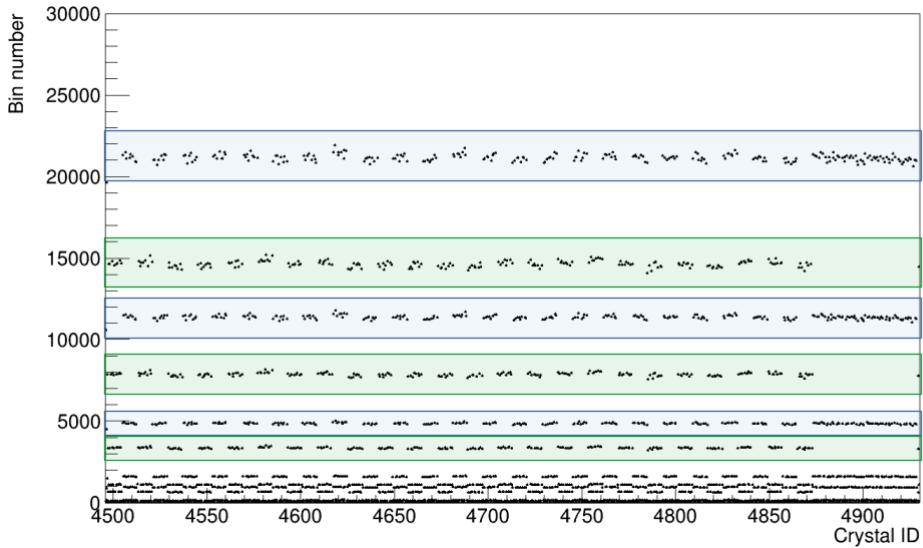


Abbildung 21: Mittelwerte aller gefundenen Signale im IPhos-Bereich für die Proton-Einstellung, obersten drei Pulser-Signale markiert (blau: 30 pC PA, grün: 45 pC PA)

4.2 Kalibrierung des Gamma-Bereichs

Überprüfung der gefundenen Signale

Zur Kontrolle der gefundenen Signale im Gamma-Bereich zeigt Abbildung 22 die Sigma-Werte der angepassten Gauß-Kurven, welche die Breite der Signale in Kanalnummern darstellen. Wie erwartet bleiben die Sigma-Werte der Pulser-Signale relativ konstant, unabhängig von der Signalamplitude, und sind geringer als die des 1274,5-keV-Signals. Dies ist nachvollziehbar, da die Pulser-Signale durch die präzise Spannungseinstellung nur geringe Schwankungen aufweisen.

Auffällig höhere Sigma-Werte deuten auf mögliche Probleme wie falsch identifizierte Signale oder elektronische Störungen auf den jeweiligen Kanälen hin. Insbesondere bei Crystal-IDs über 2000, also in den Bereichen IPhos und CEPA, zeigt sich eine deutliche Streuung. Dies liegt vermutlich an größeren Unterschieden in den Komponenten und somit in der Signalverstärkung zwischen den Vorverstärkermodulen im Vergleich zu den anderen Bereichen.

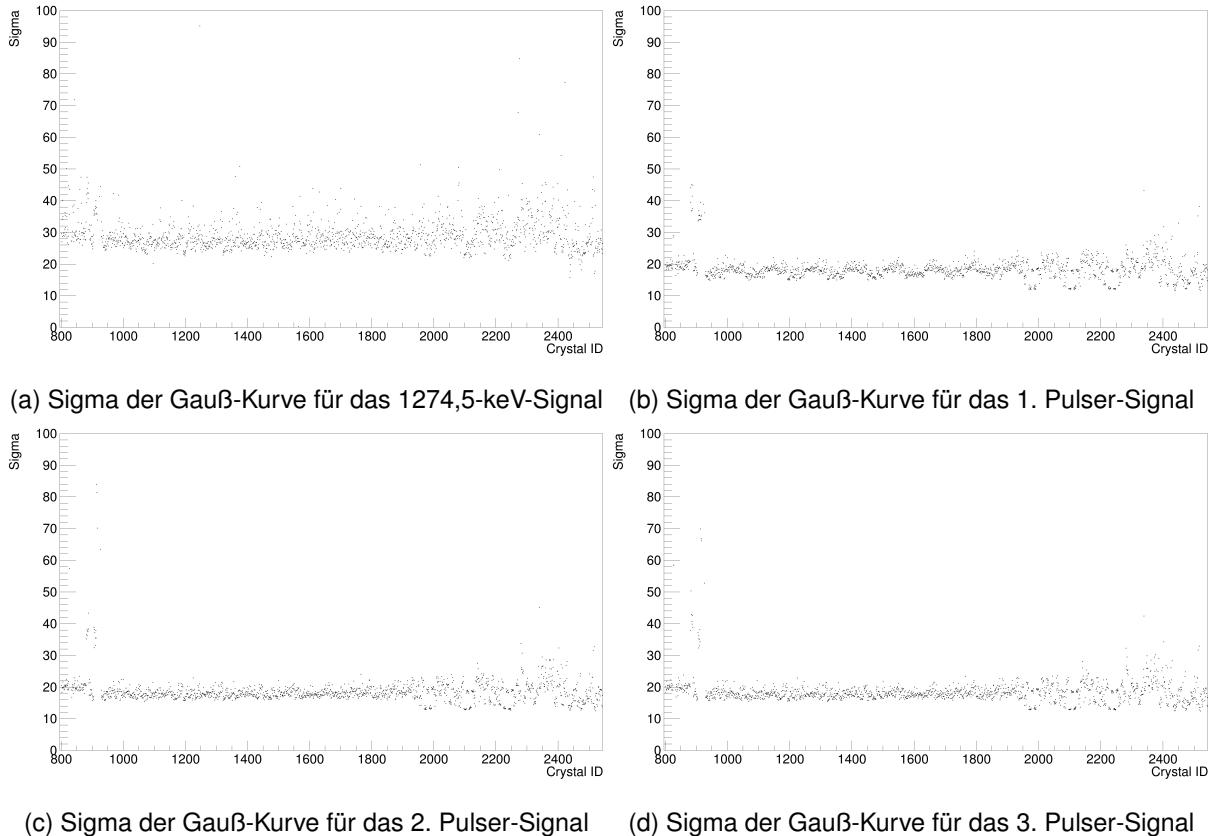


Abbildung 22: Übersicht der Standardabweichungen der angepassten Gauß-Kurven für alle Gamma-Bereich-Signale

Energiekalibrierung

Für die Kalibrierung der absoluten Skala des Gamma-Bereichs wurde die 1274,5-keV-Linie des ^{22}Na -Spektrums verwendet. Dabei wurde eine lineare Regression durchgeführt, bei der die Kanalnummer als x -Wert und die Energie als y -Wert diente. Der Offset wurde fest auf -20 keV gesetzt, basierend auf Näherungswerten aus früheren Messungen, da er mit nur einem verfügbaren Referenzwert nicht genau bestimmt werden kann. In Abbildung 23 sind die Offsets für alle Crystal-IDs dargestellt, um die Korrektheit der Parameter zu überprüfen. Bei zukünftigen Messungen mit variablem Offset kann dieser direkt abgelesen werden. Die Steigungen der linearen Anpassungen sind in Abbildung 24 dargestellt.

Wird die Regression hingegen mit beiden Signalen des ^{22}Na -Spektrums und einem variablen Offset durchgeführt, zeigt sich, dass die Offsets in Abbildung 25 um zwei Werte (ca. -23 keV und -35 keV) schwanken. Die zugehörigen Steigungen, dargestellt in Abbildung 26, zeigen kaum Abweichungen im Vergleich zu den Werten aus Abbildung 24.

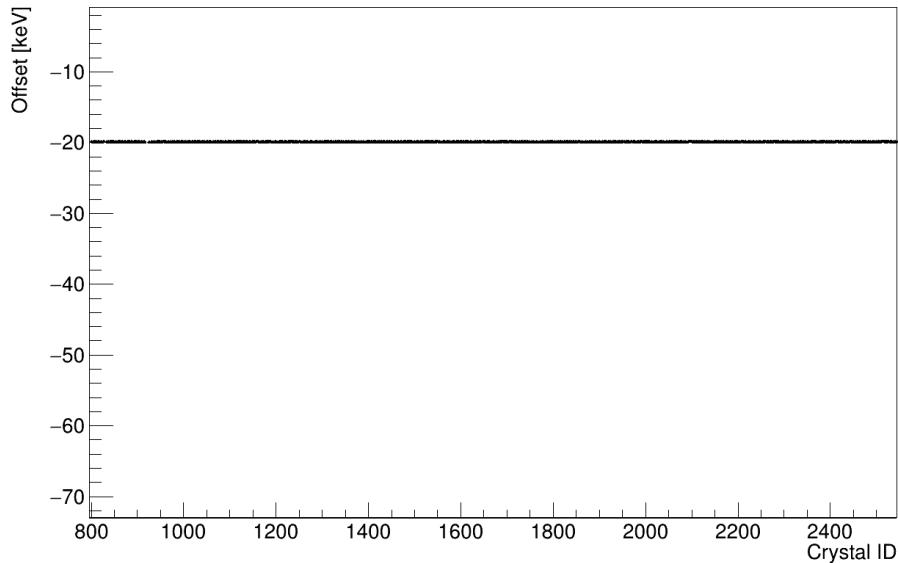


Abbildung 23: $\text{offset}_{\text{gamma}}$ aus linearer Regression mit 1274,5-keV-Signal im Gamma-Bereich

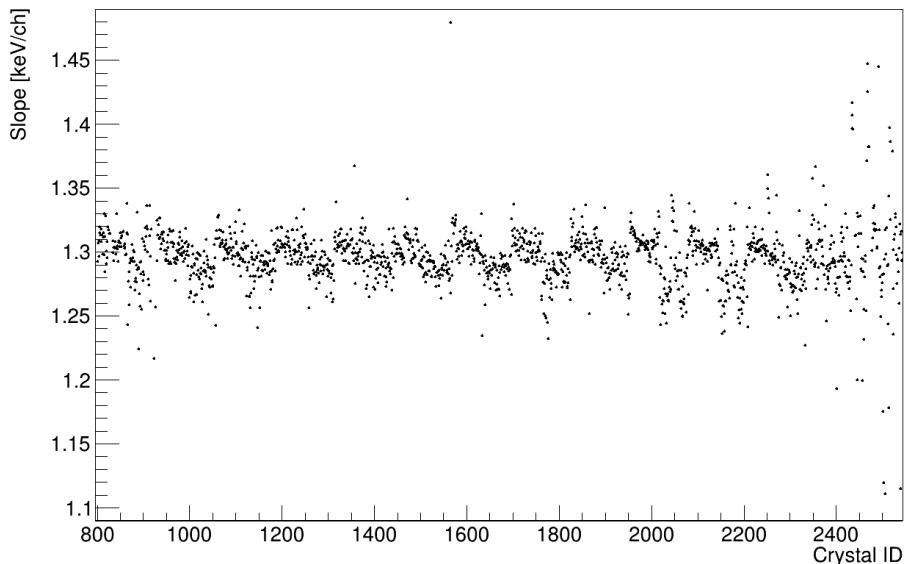


Abbildung 24: $\text{slope}_{\text{gamma}}$ aus linearer Regression mit 1274,5-keV-Signal im Gamma-Bereich

Aus den vorliegenden Messungen lässt sich nicht eindeutig bestimmen, welche Werte für die Offsets genau zutreffen. Der Unterschied zwischen den Offsets der linearen Anpassung mit einem einzigen Signal (siehe Abbildung 23) und mit beiden Quellen-Signalen (siehe Abbildung 25) beträgt lediglich wenige keV. Die Wahl des Offsets beeinflusst zusätzlich die Steigung der linearen Anpassung geringfügig. Zwischen den Ergebnissen in Abbildung 24 und 26 ergeben sich Unterschiede von wenigen Prozent.

Diese Abweichungen dürften keine signifikanten Auswirkungen auf die kalibrierten Energien haben. Es bleibt jedoch die Frage, ob der festgelegte Offset eine gute Näherung darstellt. Dies kann in

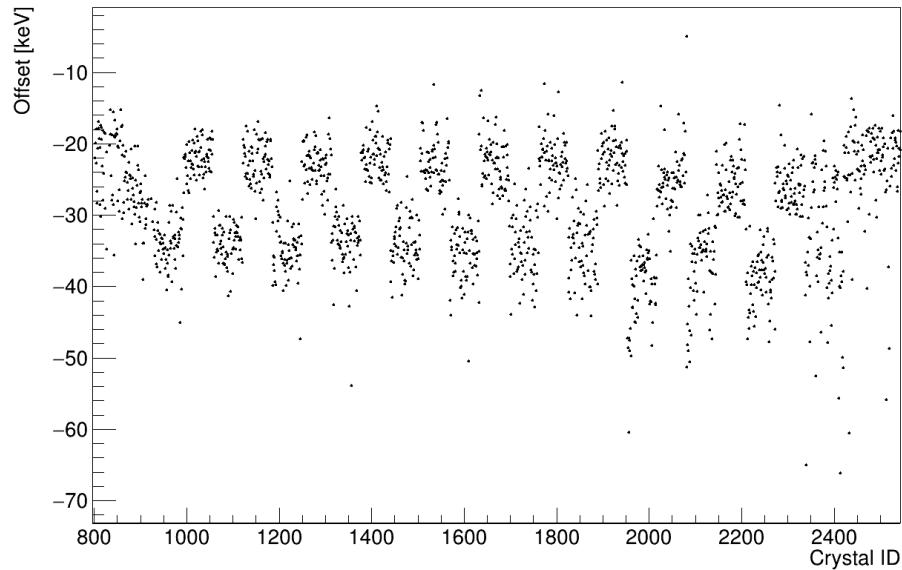


Abbildung 25: $\text{offset}_{\text{gamma}}$ aus linearer Regression mit beiden ^{22}Na -Signalen im Gamma-Bereich

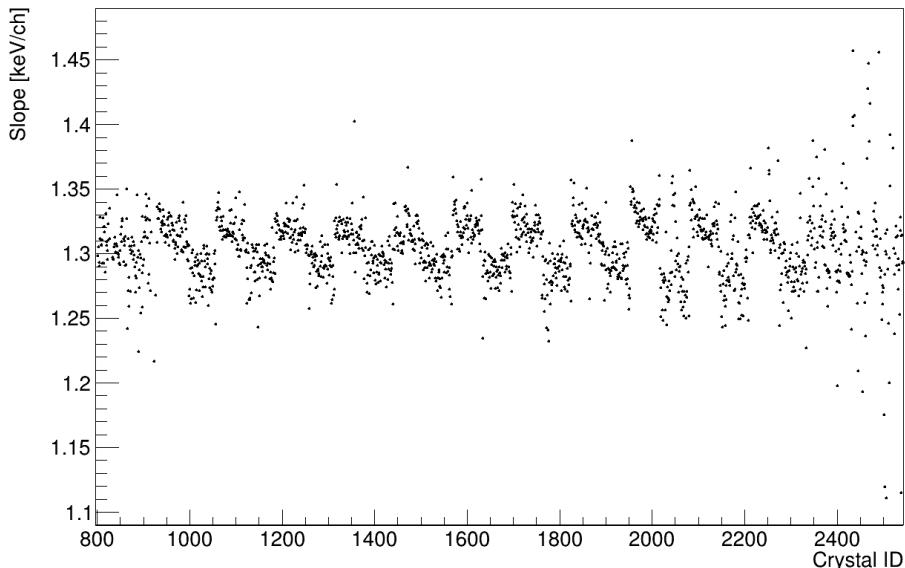


Abbildung 26: $\text{slope}_{\text{gamma}}$ aus linearer Regression mit beiden ^{22}Na -Signalen im Gamma-Bereich

Zukunft mit weiteren Messungen überprüft werden, wobei eine Quelle mit mehreren brauchbaren Linien verwendet wird. Außerdem können die Offsets unabhängig durch Messungen mit weiter abgeschwächten Pulser-Signalen noch präziser bestimmt werden.

Mithilfe der beiden Parameter $\text{offset}_{\text{gamma}}$ und $\text{slope}_{\text{gamma}}$ kann nun das gesamte Histogramm kalibriert werden. Hierzu werden die x-Achsen-Werte mit der Steigung multipliziert und anschließend der Offset addiert. Auf diese Weise lassen sich die mittleren Energien aller Signale bestimmen, wie in Abbildung 27 dargestellt.

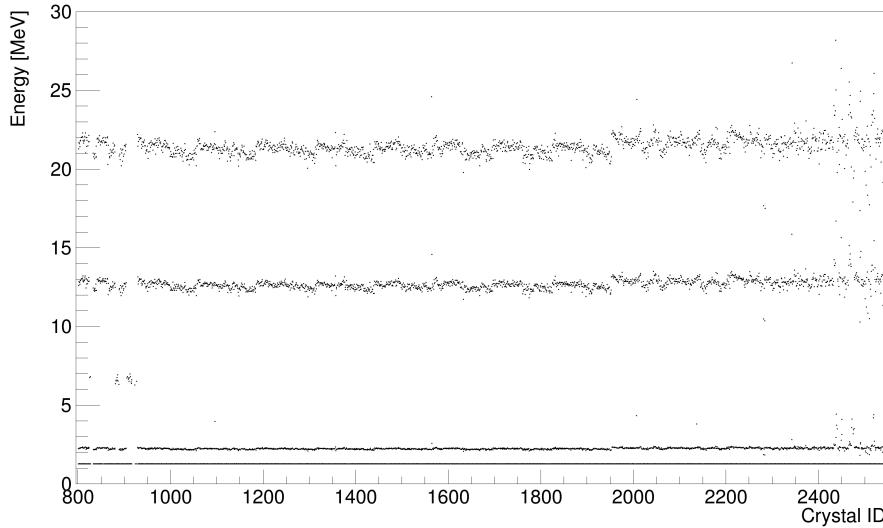


Abbildung 27: Mittlere Energien der Gamma-Bereich-Signale, kalibriert mit $\text{offset}_{\text{gamma}}$ und $\text{slope}_{\text{gamma}}$

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß eine konstante Linie für das 1274,5-keV-Signal, da bei der linearen Regression keine Freiheitsgrade vorhanden sind. Somit dient das Histogramm zur Kontrolle, um sicherzustellen, dass die Regression korrekt durchgeführt wurde. Bei einer Analyse mit mehr als zwei Referenzwerten liefert dieses zusätzlich Informationen über die Qualität der Regression. Für die Pulser-Signale zeigt sich nach der Kalibrierung das charakteristische Treppenmuster, auf das später noch genauer eingegangen wird.

4.3 Kalibrierung des Proton-Bereichs

Überprüfung der gefundenen Signale

In Abbildung 28 sind die Sigma-Werte aller gefundenen Signale im Proton-Bereich dargestellt. Wie erwartet, weisen alle Pulser-Signale ähnliche Werte auf, die im Vergleich zu den 1274,5-keV-Linien etwas kleiner sind. Im Back Barrel treten jedoch, wie bereits im Gamma-Bereich beobachtet, Ausreißer auf, die in Abschnitt 4.6 genauer untersucht werden.

Im IPHOS-Bereich zeigen die Sigma-Werte Variationen, die auf die Verwendung von zwei unterschiedlichen Dual-Range-Vorverstärkern (DR) zurückzuführen sind. Kleinere Sigma-Werte resultieren aus Vorverstärkern mit einer Empfindlichkeit von 45 pC, da die geringere Verstärkung zu schmaleren Signalen führt. Im Vergleich dazu weisen die 30 pC-Vorverstärker breitere Signale auf. Dies liefert ein weiteres Indiz dafür, dass das elektronische Rauschen bereits durch die erste Stufe der Vorverstärker dominiert wird, während die nachfolgenden Verstärkerstufen keinen nennenswerten Beitrag dazu leisten.

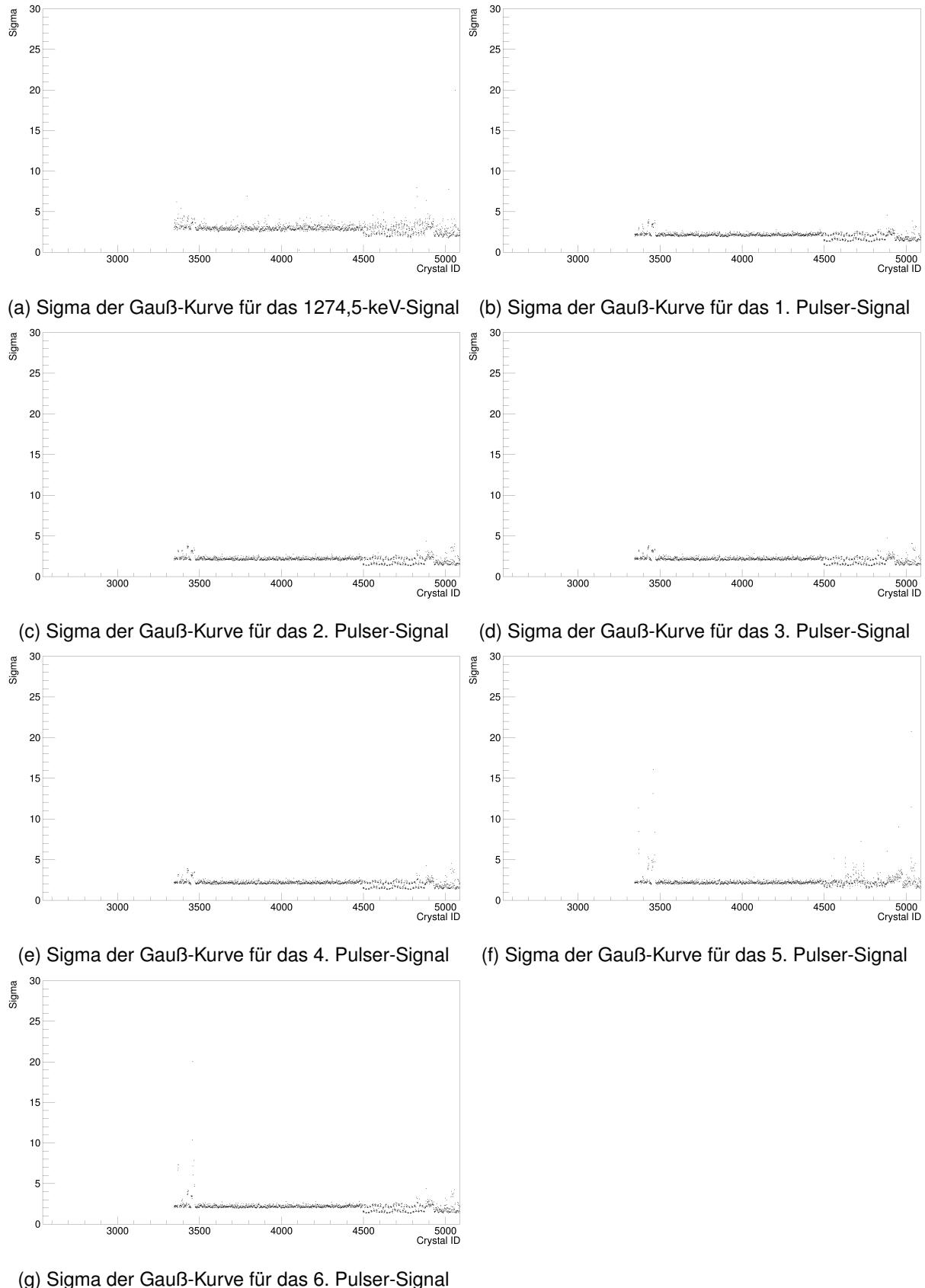


Abbildung 28: Übersicht der Standardabweichungen der angepassten Gauß-Kurven für alle Proton-Bereich-Signale

Energiekalibrierung

Für die Kalibrierung im Proton-Bereich wurden die Mittelwerte der unteren drei Pulser-Signale und die entsprechenden Energien aus dem kalibrierten Gamma-Spektrum (siehe Abbildung 27) verwendet. Eine lineare Anpassung liefert die Regressionsparameter $\text{offset}_{\text{proton}}$ und $\text{slope}_{\text{proton}}$, die in den Abbildungen 29 und 30 für alle Kristalle dargestellt sind.

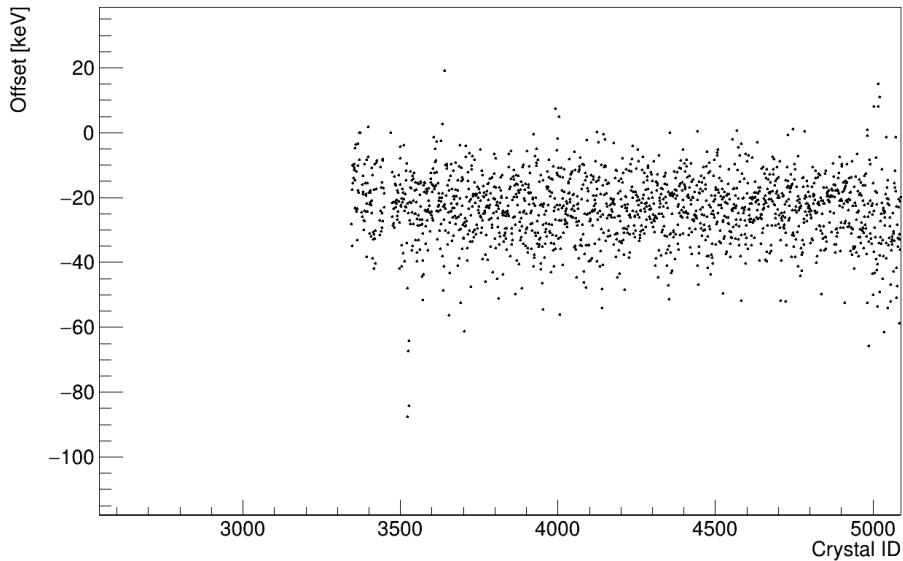


Abbildung 29: $\text{offset}_{\text{proton}}$ aus linearer Regression mit den ersten drei Pulser-Signalen im Proton-Bereich

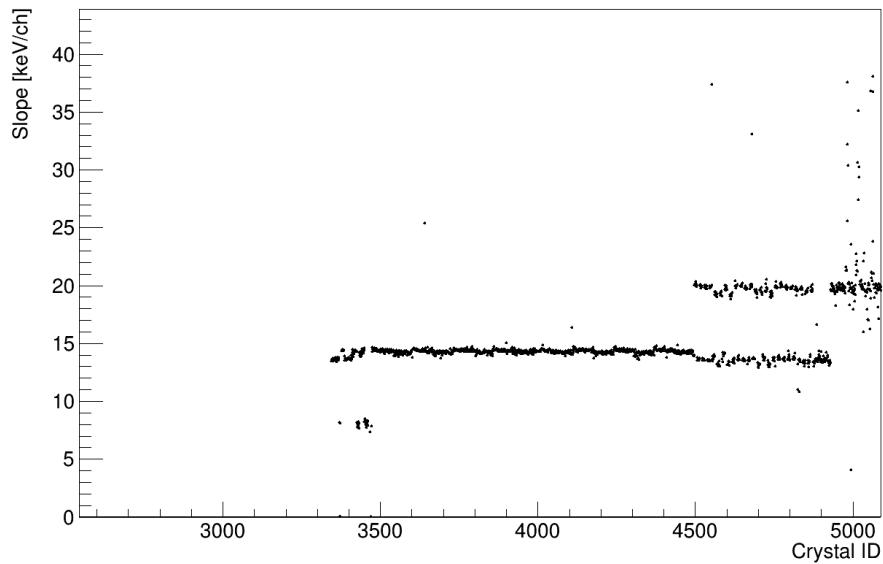


Abbildung 30: $\text{slope}_{\text{proton}}$ aus linearer Regression mit den ersten drei Pulser-Signalen im Proton-Bereich

Der Offset schwankt um den Wert -20 keV , ähnlich wie im Gamma-Bereich. Idealerweise sollten die Offset-Werte in beiden Bereichen identisch sein. Die beobachteten Abweichungen könnten un-

ter anderem durch den festgelegten Offset im Gamma-Bereich und durch Messungenauigkeiten verursacht sein.

Der Steigungswert der 30 pC-Vorverstärker zeigt Schwankungen um 14,4 keV/ch. Im IPhos-Bereich ist dieser etwas geringer, da hier die 1274,5-keV-Linie bei einer höheren Kanalnummer liegt als im Barrel-Bereich. Für die 45 pC-Vorverstärker liegt die Steigung in IPhos und CEPA bei etwa 20 keV/ch. Dies ist auf die geringere Signalverstärkung zurückzuführen, wodurch die Kanalnummern kleiner ausfallen.

Mithilfe der Regressionsparameter $\text{offset}_{\text{proton}}$ und $\text{slope}_{\text{proton}}$ wurde das gesamte Proton-Spektrum analog zum Gamma-Bereich kalibriert. Die kalibrierten mittleren Energien sind in Abbildung 31 dargestellt. Hier zeigt sich ein ähnliches Muster der Mittelwerte wie im Gamma-Bereich.

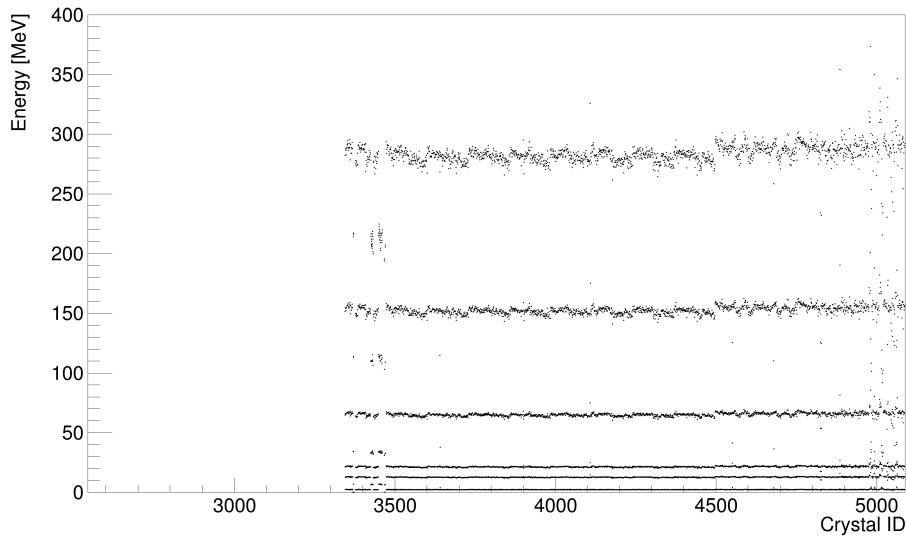


Abbildung 31: Mittlere Energien der Proton-Bereich-Signale, kalibriert mit $\text{offset}_{\text{proton}}$ und $\text{slope}_{\text{proton}}$

Verschiedene Faktoren der Signalverarbeitung und Korrektur der Pulser-Signale

Da alle Vorverstärker identische Pulser-Signale erhalten, sollten die kalibrierten Werte idealerweise auf einer Linie liegen, was in Abbildung 31 jedoch nicht der Fall ist. Ein Blick auf den Schaltplan (siehe Abbildung 4) zeigt, dass Pulser- und APD-Signale von zwei separaten Eingängen stammen, die beide in die Integrator-Stufe führen. Während das ^{22}Na -Spektrum zur Kalibrierung des APD-Eingangs genutzt wird, enthält der Pulser-Eingang zusätzlich einen Koppelkondensator C_{Pulser} , dessen Kapazität zwischen den Vorverstärkern variieren kann.

Darüber hinaus beeinflussen Faktoren wie Unterschiede in den Kristallen und Hochspannungen die APD-Signale, nicht jedoch die des Pulsers. Dies hat zur Folge, dass die Pulser-Signale nicht exakt auf einer Linie liegen, da die für die Kalibrierung verwendeten Parameter diese Faktoren beinhalten.

Für die Energiekalibrierung spielt es jedoch keine Rolle, ob alle kalibrierten Pulser-Signale denselben Wert aufweisen, da sie lediglich als Referenzwerte dienen.

Um die Energieabhängigkeit zu beseitigen, wurden die ersten drei kalibrierten Pulser-Energien aus Abbildung 31 durch die jeweiligen Spannungen dividiert. Spannungsänderungen am Pulser führen zu Ladungsänderungen am Koppelkondensator ($\Delta Q = C \cdot \Delta U$), wodurch elektrische Ströme weitergeleitet werden. Folglich sollte die Pulser-Energie proportional zur angelegten Spannung sein, wie in Abschnitt 4.4 überprüft wird.

Die so bestimmten Werte schwanken um etwa 50,6 und sind in Abbildung 32 dargestellt. Innerhalb einer einzelnen Crystal-ID bleiben diese Faktoren nahezu identisch, da nur hardwarebedingte Faktoren übrigbleiben, die für alle Messungen eines Kristalls konstant sein sollten. Das beobachtete Muster zeigt somit die Schwankungen, die durch Unterschiede in den Faktoren der APD-Stufe und des Pulser-Koppelkondensators zwischen den einzelnen Detektorelementen verursacht werden.

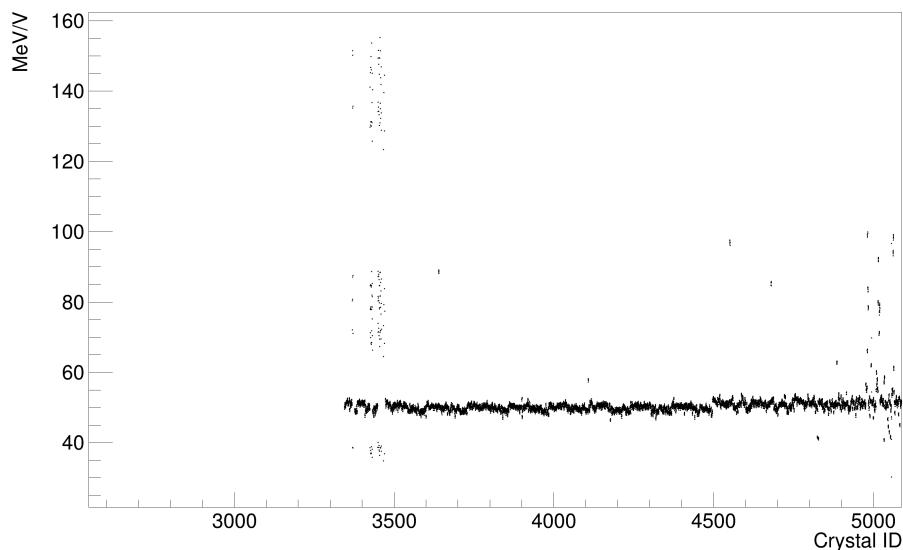


Abbildung 32: Verhältnis der kalibrierten Pulser-Energie-Mittelwerte zu den zugehörigen Spannungen der ersten drei Pulser-Signale

Zunächst wurde für jeden Kristall aus den drei Faktoren ein Mittelwert gebildet. Anschließend erfolgte eine Normierung, indem dieser durch den Gesamtmittelwert aller Kristallmittelwerte dividiert wurde. Mithilfe dieser normierten Faktoren wurden schließlich die kalibrierten Pulser-Energien skaliert. In Abbildung 33 ist zu erkennen, dass die Pulser-Signale nun nahezu auf Geraden liegen. Ausreißer deuten auf eine fehlerhafte Kalibrierung hin, siehe Abschnitt 4.6.

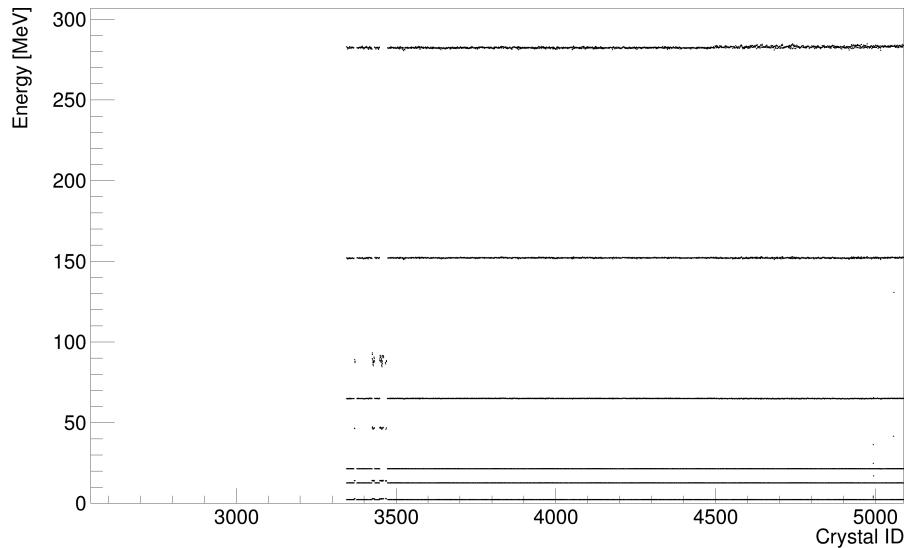


Abbildung 33: Kalibrierte und faktorbereinigte Pulser-Energie-Mittelwerte im Proton-Bereich

4.4 Überprüfung der Linearität des Pulsters

Zur Überprüfung der Linearität des Pulsters in Bezug auf Spannung und Energie und somit auch der Elektronikkette wurden die kalibrierten Energien, berechnet mit den Parametern $\text{offset}_{\text{proton}}$ und $\text{slope}_{\text{proton}}$, mit Energien verglichen, die auf Basis der Spannungen bestimmt wurden.

Als Referenz diente die zuvor im Gamma-Bereich ermittelte kalibrierte Energie des ersten Pulser-Signals. Die Energien des 4., 5. und 6. Pulser-Signals wurden durch Multiplikation der Energie des ersten Signals mit dem Verhältnis der jeweiligen Pulser-Spannung zur Spannung des ersten Signals berechnet. Diese wurden hierfür an einem Oszilloskop abgelesen.

Abbildung 34 zeigt die prozentualen Abweichungen der Energien dieser drei Signale zwischen den durch die lineare Regression berechneten Werten und denen, die aus den Spannungsverhältnissen bestimmt wurden. Die Abweichungen sind minimal und bestätigen die Linearität des Pulsters. Insbesondere unter Berücksichtigung der begrenzten Messgenauigkeit der Pulser-Spannungen, die am Oszilloskop mit einer Präzision von wenigen Prozent abgelesen wurden. Für zukünftige Messungen wäre eine genauere Spannungsmessung sinnvoll.

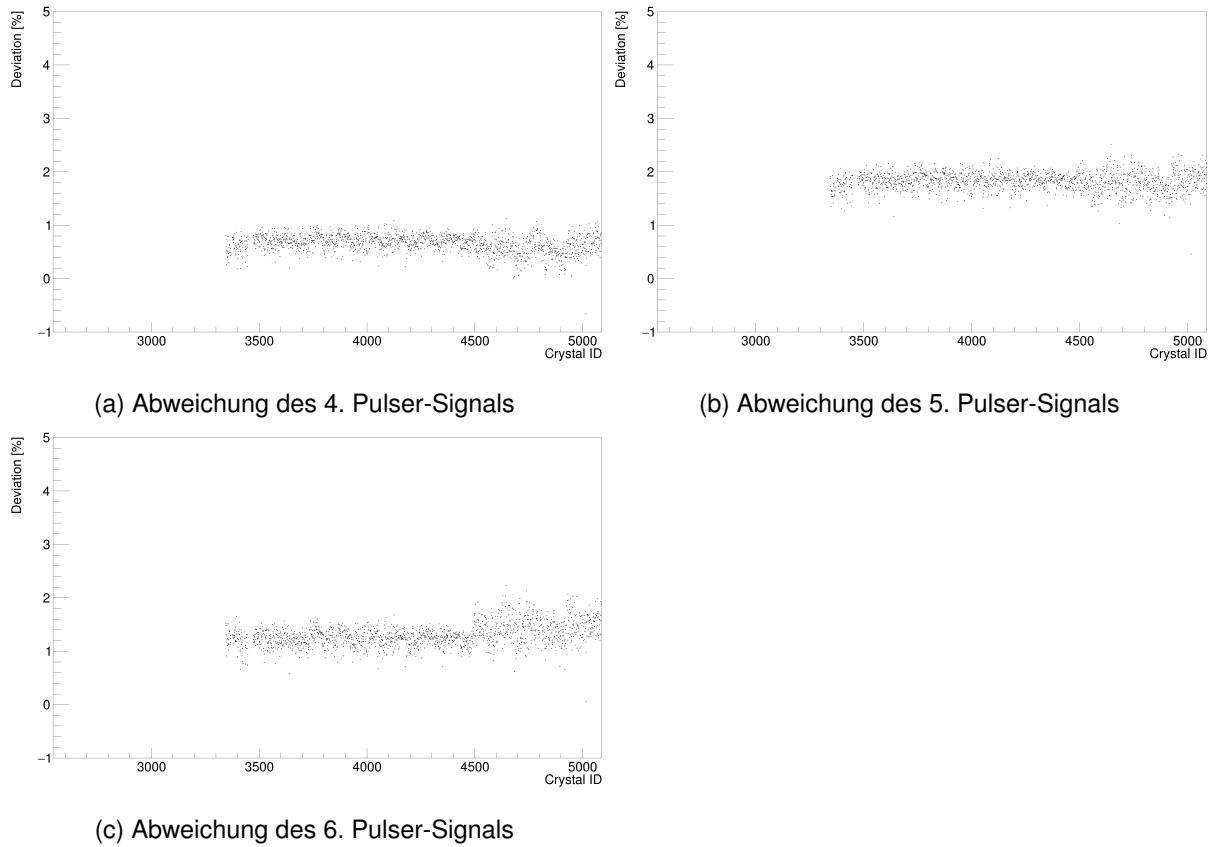
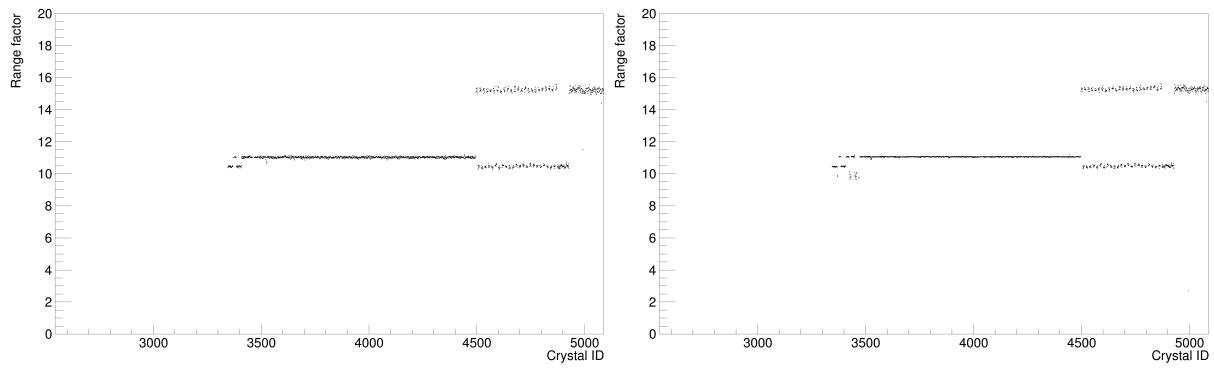


Abbildung 34: Prozentuale Abweichungen zwischen den Energien aus der linearen Regression und den Energien, die aus Spannungsverhältnissen berechnet wurden, für 4., 5. und 6. Pulser-Signal

4.5 Range-Faktor

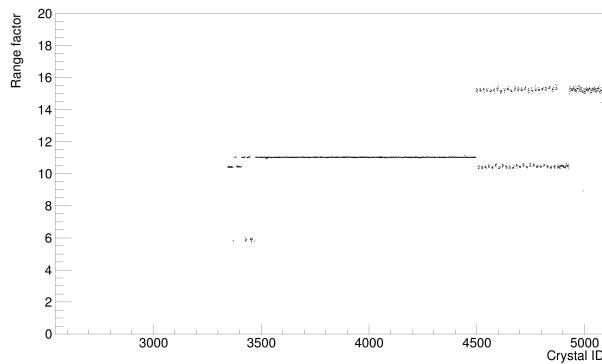
Im nächsten Schritt wurde der sogenannte Range-Faktor ermittelt, der das Verstärkungsverhältnis zwischen Gamma- und Proton-Bereich beschreibt. Die Ablesung absoluter Spannungswerte ist hierbei nicht mehr relevant, da diese aufgrund identischer Pulserinstellungen in beiden Messbereichen gleich sind. Zur Bestimmung des Range-Faktors wurden die Kanalnummern der ersten drei Pulser-Signale im Gamma-Bereich durch die entsprechenden Kanalnummern im Proton-Bereich dividiert. Die resultierenden Werte sind in Abbildung 35 dargestellt.

Die Range-Faktoren sind für Kristalle mit identischer Vorverstärkerkonfiguration sehr ähnlich. Im Barrel liegen sie für alle Pulser-Signale bei etwa 11. Im IPHOS-Bereich sind die Werte bei den 3/30 pC-Vorverstärkern etwas geringer, während sie bei den 3/45 pC-Vorverstärkern um etwa 15,2 liegen. Bei einigen Kristallen im Back Barrel liegen die zweiten und dritten Pulser-Signale aufgrund einer höheren Verstärkung im Gamma-Bereich außerhalb des Messbereichs, was zu falschen Kanalnummern führt (siehe Abschnitt 4.6). Dadurch ergeben sich niedrigere Faktoren als beim ersten Pulser-Signal.



(a) Range-Faktor des ersten Pulser-Signals

(b) Range-Faktor des zweiten Pulser-Signals



(c) Range-Faktor des dritten Pulser-Signals

Abbildung 35: Range-Faktor basierend auf dem Verhältnis der Kanalnummern der Pulser-Signale zwischen Gamma- und Proton-Bereich

In Abbildung 36 sind die Durchschnittswerte der Range-Faktoren aller drei Pulser-Signale dargestellt.

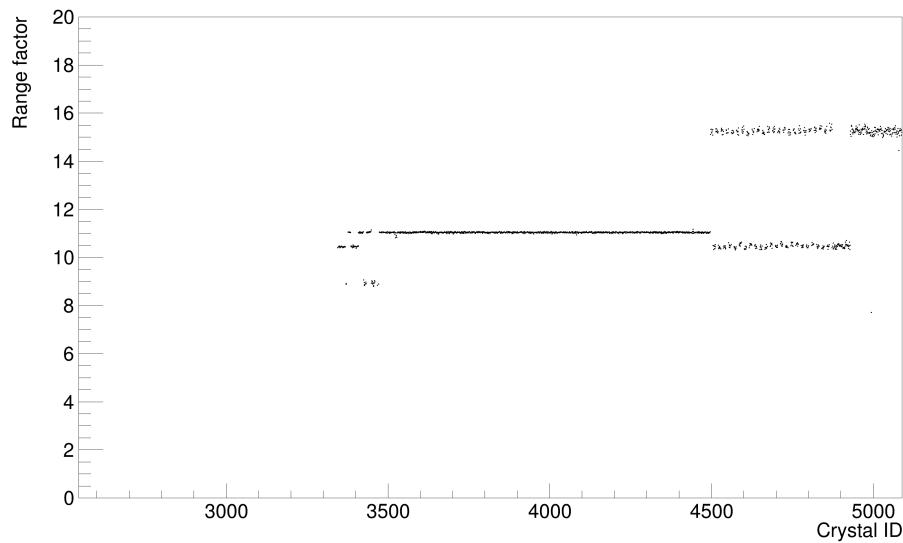


Abbildung 36: Mittelwerte der Range-Faktoren, basierend auf dem Verhältnis der Kanalnummern der drei Pulser-Signale zwischen Gamma- und Proton-Bereich

Betrachten wir nun die Mittelwerte der Range-Faktoren im Barrel-Bereich und deren Häufigkeitsverteilung (siehe Abbildung 37), so wird deutlich, dass diese äußerst konsistent sind. Die Standardabweichung beträgt lediglich etwa 0,02, was einer Toleranz von nur 0,2 % entspricht. Dies zeigt, dass die Widerstände in der Gain-Stufe mit hoher Genauigkeit definiert sind.

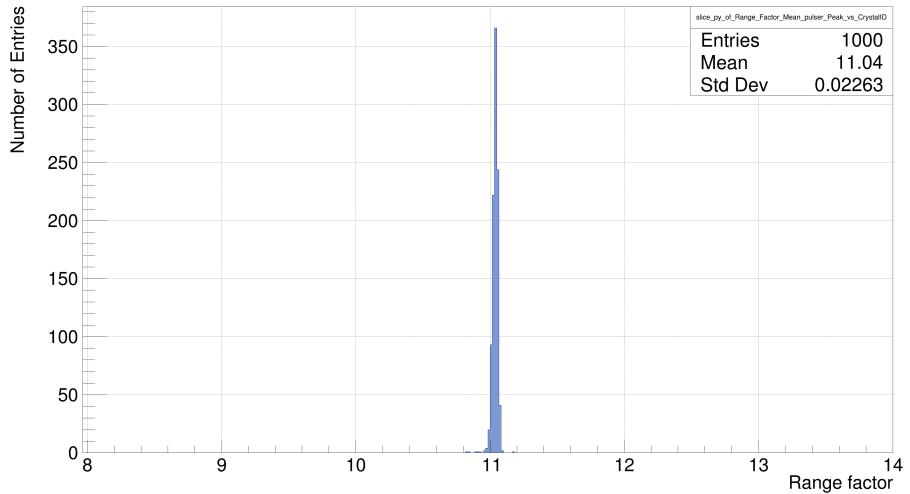


Abbildung 37: Häufigkeitsverteilung der Mittelwerte der Range-Faktoren im Barrel

Histogramme zur Qualitätskontrolle und Fehlerlokalisierung

Die Crystal-IDs dienen ausschließlich der Numerierung und liefern keinen direkten Hinweis auf den zugehörigen Vorverstärker oder andere spezifische Bauteile des jeweiligen Detektorelements. Um Fehler zukünftig schneller lokalisieren zu können, kann die Crystal-ID mit den Raumwinkeln θ (in Richtung des Teilchenstrahls) und ϕ (senkrecht zum Teilchenstrahl) verknüpft werden. In Abbildung 38 ist der Range-Faktor in Abhängigkeit von diesen beiden Winkeln dargestellt.

Zusätzlich lassen sich die Range-Faktoren direkt über die Parameter Detektorhälfte (WIX: Wixhausen, MES: Messel), PC (0 oder 1), Febex-SFP (0 bis 3), Febex-Modul (0 bis 15) und Febex-Kanal (0 bis 15) zuordnen. Dadurch können die entsprechenden Bauteile unmittelbar identifiziert werden. Abbildung 39 zeigt ein typisches Schema, das auch in der Analyse-Software Go4 in Darmstadt verwendet wird.

Beispielsweise ist in Abbildung 38 bei den Winkeln $\theta \approx 18,5^\circ$ und $\phi \approx 61^\circ$ sowie zugehörig in Abbildung 39 bei den Koordinaten (83, 15) ein deutlich zu hoher Range-Faktor am roten Wert zu erkennen. Diese Histogramme ermöglichen die Identifikation aller zugehörigen Komponenten des Detektorelements. Dadurch wird eine schnelle sowie präzise Lokalisierung defekter Komponenten oder anderer Fehlerquellen ermöglicht.

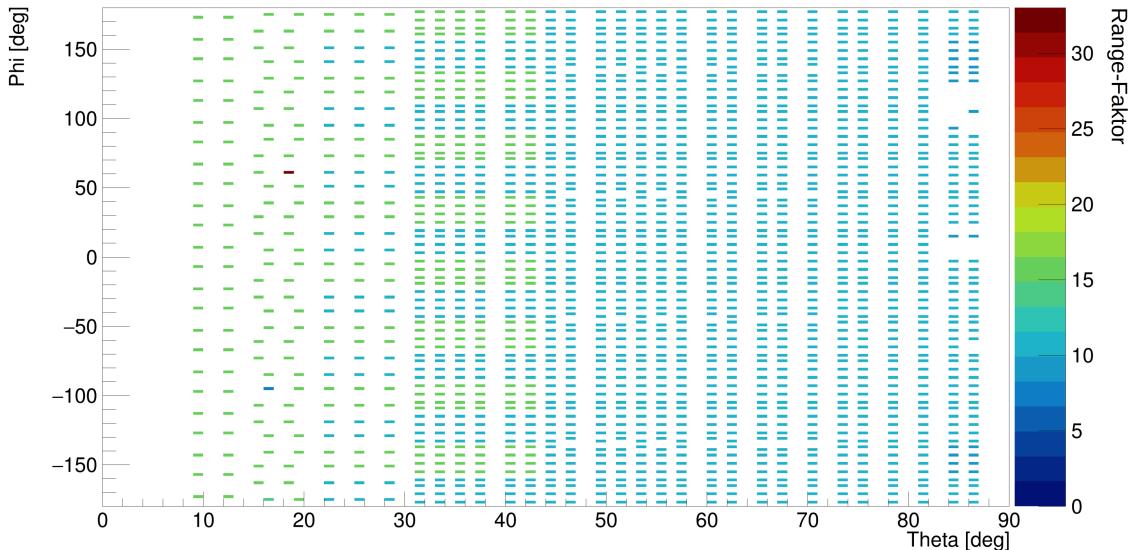


Abbildung 38: Range-Faktor in Abhängigkeit der Raumwinkel θ und ϕ

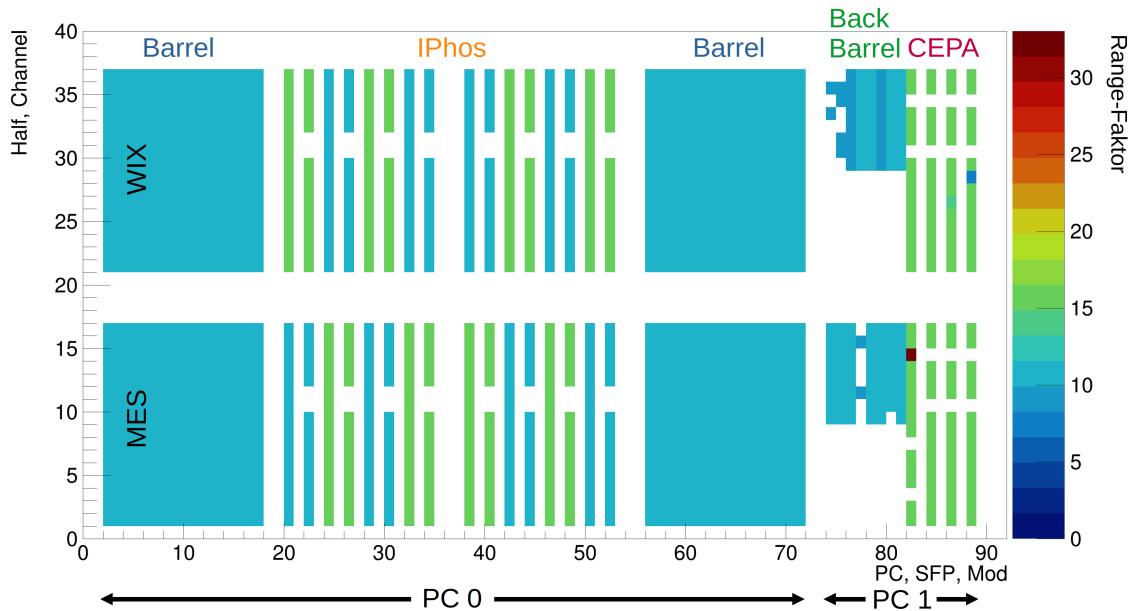


Abbildung 39: Range-Faktor in Abhängigkeit der Parameter Detektorhalfte, PC, Febex-SFP, Febex-Modul und Febex-Kanal

Energiekalibrierung unter Verwendung des Range-Faktors

Wie in Abschnitt 2.3.1 erläutert, kann der Range-Faktor zur Energiekalibrierung genutzt werden, da sich der Gamma- und Proton-Bereich lediglich um diesen Faktor unterscheiden. Zukünftig reicht es daher aus, ausschließlich das Gamma-Spektrum zu kalibrieren, wofür eine radioaktive Quelle vollkommen ausreichend ist. Mit dem bekannten Range-Faktor lassen sich die Kalibrierungsparameter des Proton-Bereichs direkt aus denen des Gamma-Bereichs ableiten.

Der Range-Faktor ist ausschließlich hardwarebedingt und sollte daher konstant bleiben. Er muss lediglich einmal bestimmt werden. Es bleibt jedoch offen, ob und wie stark er langfristig durch Verschleiß oder Alterung der Komponenten beeinflusst wird. Regelmäßige Vergleichsmessungen können dies überprüfen.

Der Pulser ist somit grundsätzlich nicht mehr erforderlich, da eine Kalibrierung im Gamma-Bereich genügt, was den Kalibrierungsprozess erheblich vereinfacht und beschleunigt. Falls jedoch neue Detektorelemente hinzugefügt werden, muss für diese zunächst der Range-Faktor bestimmt werden, bevor die Methode angewendet werden kann.

4.6 Herausforderungen bei der Kalibrierung: Analyse spezieller Detektorelemente

Einige Detektorelemente weisen Besonderheiten auf, die die Kalibrierung erschweren. Im Folgenden werden anhand ausgewählter Histogramme Fehlerquellen analysiert und mögliche Lösungen vorgeschlagen.

Crystal-ID 906

Abbildung 40 zeigt das Gamma-Bereich-Histogramm für Crystal-ID 906 im Back Barrel. Die Pulser-Signale liegen hier bei Kanalnummern, die etwa um den Faktor 3 höher sind als üblich. Zum Vergleich ist in Abbildung 41 das Histogramm für Crystal-ID 900 dargestellt, das typische Signal-Kanalnummern zeigt. Diese Abweichung deutet darauf hin, dass der Vorverstärker von Crystal-ID 906 eine geringere Empfindlichkeit als 3 pC im Gamma-Bereich aufweist.

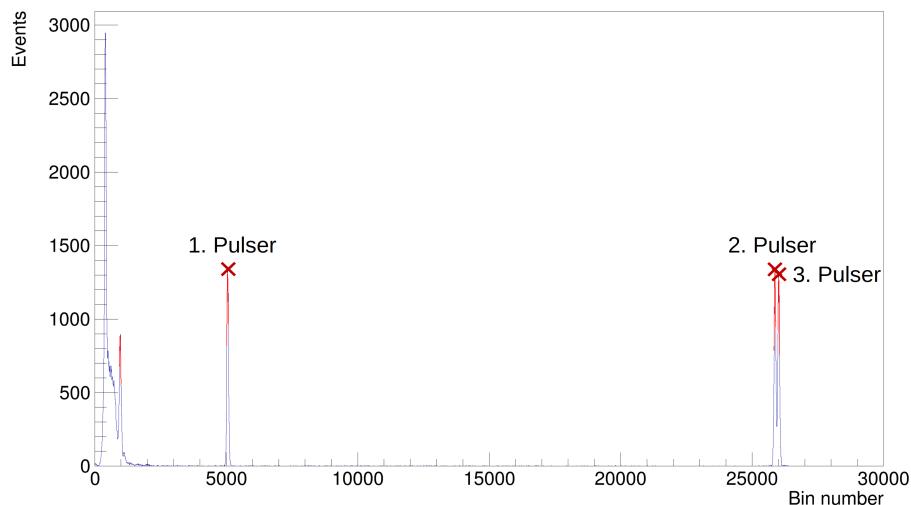


Abbildung 40: Histogramm im Gamma-Bereich, Crystal-ID 906

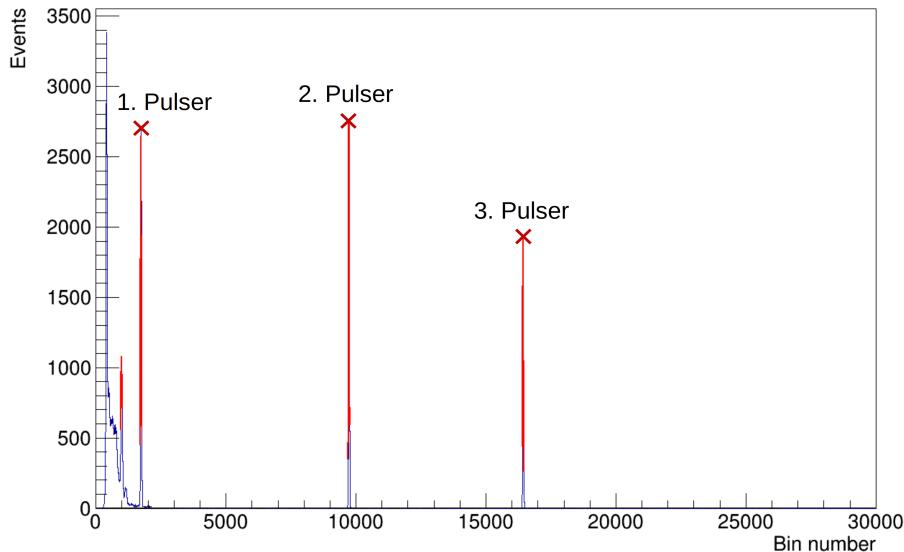


Abbildung 41: Histogramm im Gamma-Bereich mit regulären Pulser-Kanalnummern, Crystal-ID 900

Die Positionen der ^{22}Na -Linien bleiben in beiden Histogrammen unverändert. Eine erfolgreiche Energiekalibrierung ist für Crystal-ID 906 jedoch nicht möglich, da die beiden oberen Pulser-Signale außerhalb des Gamma-Bereichs liegen und nicht korrekt erkannt werden können. Stattdessen erscheinen sie lediglich als Rauschen bei einer Kanalnummer von etwa 26000.

Eine mögliche Lösung besteht in einer separaten Messung für diese Kristalle mit reduzierten Pulserspannungen (etwa ein Drittel der bisherigen Spannungen), sodass alle Signale innerhalb des Gamma-Bereichs liegen. Langfristig wird dieses Problem jedoch nicht mehr auftreten, da alle Vorverstärker im Back Barrel vereinheitlicht werden sollen.

Crystal-ID 1096

Das ^{22}Na -Spektrum von Crystal-ID 1096 (siehe Abbildung 42) zeigt eine deutliche Verschiebung nach links, wodurch das 511-keV-Signal abgeschnitten wurde. Die Kalibrierung konnte zwar erfolgreich durchgeführt werden, ergibt jedoch eine überdurchschnittlich hohe Steigung. Dies kann in den Qualitätskontroll-Histogrammen fälschlicherweise als eine fehlgeschlagene Kalibrierung gedeutet werden.

Crystal-ID 2007

Bei Crystal-ID 2007 ist das ^{22}Na -Spektrum nach rechts verschoben, wie in Abbildung 43 zu sehen ist. Die 1274,5-keV-Linie liegt außerhalb des definierten Suchbereichs für die Quellen-Signale, sodass stattdessen die 511-keV-Linie fälschlicherweise für die Kalibrierung verwendet wird. Die obere

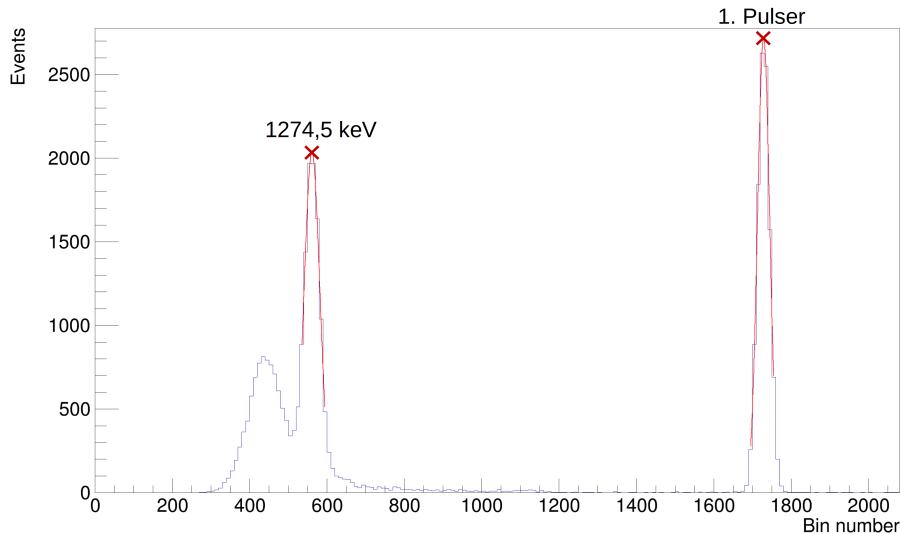


Abbildung 42: Histogramm im Gamma-Bereich, Crystal-ID 1096

Grenze des Suchbereichs wurde bei Kanalnummer 1300 festgelegt, um eine Verwechslung mit dem ersten Pulser-Signal zu vermeiden. Diese Einstellung führt jedoch in diesem speziellen Fall dazu, dass die Kalibrierung fehlschlägt.

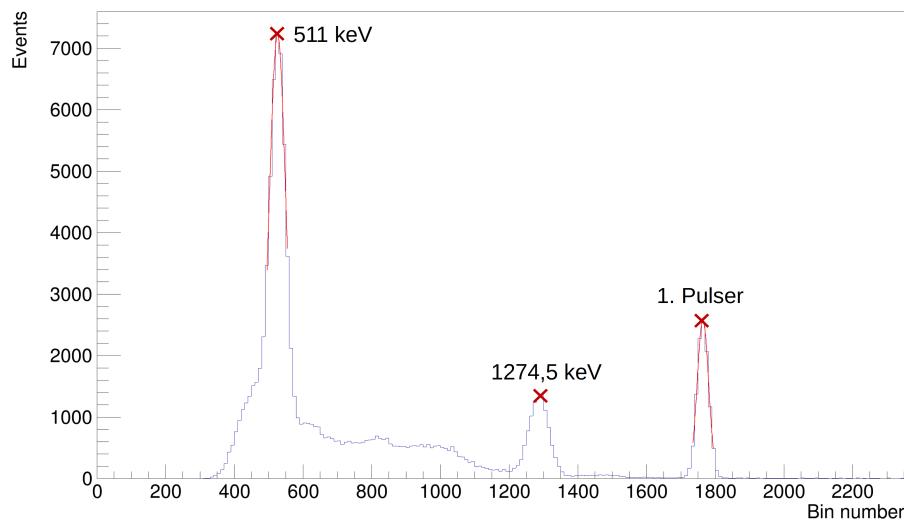


Abbildung 43: Histogramm im Gamma-Bereich, Crystal-ID 2007

Crystal-ID 2440

Das ^{22}Na -Spektrum von Crystal-ID 2440 (siehe Abbildung 44) zeigt eine deutliche Linksverschiebung. Die untere Grenze des Suchbereichs für die Quellen-Signale wurde auf 500 festgelegt, um sicherzustellen, dass weder die 511-keV-Linie noch Rauschen fälschlicherweise als 1274,5-keV-Linie erkannt werden. Durch die Verschiebung liegt das 1274,5-keV-Signal jedoch außerhalb des Suchbereichs und wird nicht erfasst. Stattdessen wird ein Rauschsignal innerhalb des definierten Bereichs ausgewählt.

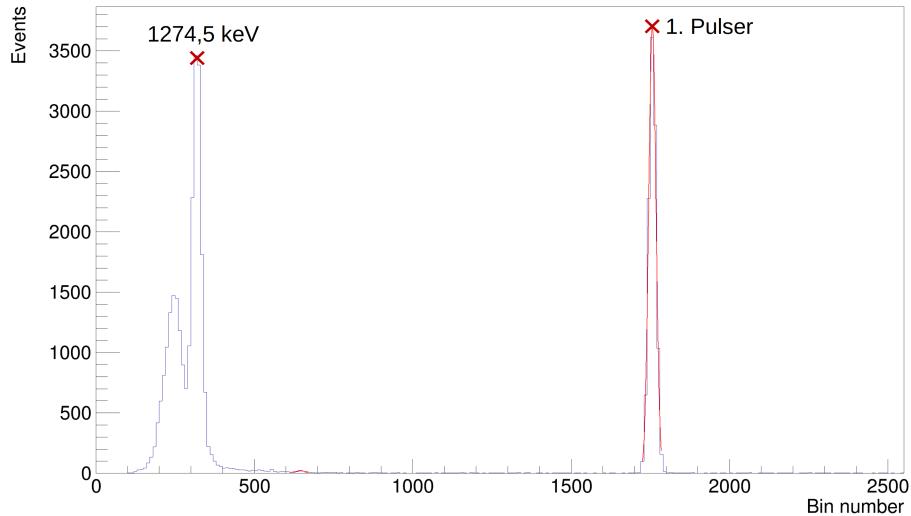


Abbildung 44: Histogramm im Gamma-Bereich, Crystal-ID 2440

Crystal-ID 5057

Abbildung 45 zeigt eine deutliche Rechtsverschiebung des ^{22}Na -Spektrums im Proton-Bereich. Das erste Pulser-Signal liegt zwischen den beiden ^{22}Na -Linien, anstatt, wie vorausgesetzt, oberhalb zu liegen. Dies führt dazu, dass die 511-keV-Linie fälschlicherweise als 1274,5-keV-Linie erkannt wird, während das zweite Pulser-Signal der tatsächlichen 1274,5-keV-Linie zugeordnet wird. Unter anderem ergibt sich dadurch ein fehlerhafter und stark erhöhter Range-Faktor, der im CEPA-Bereich von Abbildung 39 deutlich sichtbar ist.

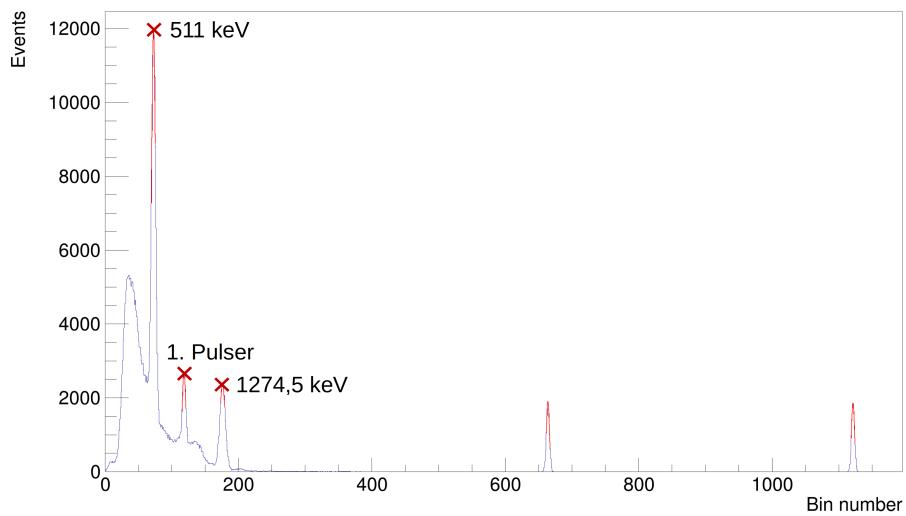


Abbildung 45: Histogramm im Proton-Bereich, Crystal-ID 5057

Lösungsvorschläge für Crystal-IDs 1096, 2007, 2440 und 5057:

Bei all diesen Kristallen wurde ein fehlerhaftes Gain-Matching der LAAPDs diagnostiziert. Eine präzisere Einstellung der Hochspannungen ist notwendig, um sicherzustellen, dass die 1274,5-keV-Linien zuverlässig bei derselben Kanalnummer für alle Vorverstärker mit gleicher Empfindlichkeit liegen. Eine erfolgreiche Anpassung sollte die beschriebenen Probleme vollständig beheben.

Falls bei einzelnen Detektorelementen keine optimale Hochspannungseinstellung möglich ist, könnten die Suchbereiche für die betroffenen Kristalle individuell angepasst werden, um fehlerhafte Zuordnungen zu vermeiden. Für Crystal-ID 5057 könnte zusätzlich eine separate Messung durchgeführt werden, bei der die Spannung des ersten Pulser-Signals erhöht wird, um eine klare Trennung von den ^{22}Na -Linien zu ermöglichen.

Das Softwarepaket dient somit auch als Diagnosetool und zeigt zuverlässig, ob das Gain-Matching korrekt durchgeführt wurde. Es sollte daher vor einem Experiment eingesetzt werden, um alle Kanäle zu überprüfen und gegebenenfalls das Gain-Matching weiter zu optimieren.

5 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Energiekalibrierung des CALIFA-Kalorimeters zu optimieren und den Prozess zu automatisieren. Der Gamma-Bereich wurde mithilfe einer ^{22}Na -Quelle abgestimmt, während die Kalibrierung des Proton-Bereichs durch einen elektronischen Pulser erfolgte. Hierbei kamen identische Pulser-Signale in beiden Bereichen zum Einsatz, deren Energiewerte aus dem kalibrierten Gamma-Spektrum abgeleitet wurden, um im Proton-Bereich als Referenz zu dienen.

Die Kalibrierung konnte für die meisten Kristalle erfolgreich durchgeführt werden. Dennoch traten Herausforderungen auf, insbesondere im Back Barrel. Unterschiedliche Vorverstärkertypen erfordern individuelle Anpassungen, und ein konsistentes Gain-Matching war noch nicht vollständig umgesetzt. Dies führte dazu, dass die Signale weniger Kristalle erheblich von den durchschnittlichen Kanalnummern abwichen, was zu fehlerhaften Signal-Zuordnungen führte. Ein weiteres Problem waren die Triggereinstellungen, die es teilweise nicht erlaubten, den vollständigen Verlauf des Peaks der niederenergetischen 511-keV-Linie zu erfassen. Dadurch konnten diese Signale nicht zuverlässig verwendet werden. Eine Reduzierung des Thresholds war nur eingeschränkt möglich, da ansonsten auch kleine Signale, die entweder durch Signalrauschen oder elektronische Störungen verursacht werden, ausgelesen werden. Dies würde zu einer stark ansteigenden Datenrate und somit zu einer zusätzlichen Datenlast führen, die für einige Kanäle erheblich sein kann.

Ein zentraler Teil dieser Arbeit war die Bestimmung des Range-Faktors der Vorverstärker. Dieser ermöglicht in Zukunft eine deutlich einfachere Kalibrierung, da der Proton-Bereich aus dem Gamma-Bereich abgeleitet werden kann, ohne dass Pulser-Signale erforderlich sind. Eine radioaktive Quelle genügt in diesem Fall, um beide Bereiche zu kalibrieren. Da der Range-Faktor hardwarebedingt ist, sollte er über längere Zeit konstant bleiben, sodass eine einmalige Bestimmung ausreichend ist.

Die Ergebnisse haben gezeigt, welche Detektorelemente bereits gut funktionieren und wo Anpassungen erforderlich sind. Sie liefern zudem eine Grundlage für zukünftige Überprüfungen, um festzustellen, ob sich die Hardware oder die Elektronik des Systems im Laufe der Zeit verändert hat, beispielsweise durch Alterung oder Defekte.

Mit der Fertigstellung von CALIFA wird eine erneute Kalibrierung erforderlich sein. Die entwickelte Kalibrierungssoftware ist bereits darauf ausgelegt und erfordert keine grundlegenden Änderungen. Die Verwendung einer alternativen Quelle mit mehreren Gamma-Linien bei unterschiedlichen Energien könnte die Kalibrierung weiter verbessern, indem sie variable Offsets ermöglicht. Insbesondere bildet diese Arbeit eine Grundlage für spätere Streuexperimente, um einen direkten Vergleich zwischen den erwarteten und den gemessenen Signalamplituden zu ermöglichen.

Literatur

- [1] GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Forschung bei GSI - Ein Überblick. https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/forschung_ein_ueberblick. Zugriff am 19. November 2024.
- [2] GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Zahlen und Fakten zum FAIR-Projekt. https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/fair/zahlen_und_fakten_zum_fair_projekt. Zugriff am 19. November 2024.
- [3] GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Die Beschleunigeranlagen von FAIR und GSI. https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/fair/die_maschine. Zugriff am 19. November 2024.
- [4] GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. R3B-Experiment. https://www.gsi.de/work/forschung/nustarena/nustarena_divisions/kernreaktionen/activities/r3b. Zugriff am 19. November 2024.
- [5] GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Forschungsgebiete und Experimente an der GSI. <https://www.gsi.de/work/forschung>. Zugriff am 19. November 2024.
- [6] K. Boretzky, I. Gašparić, M. Heil, and et al. Neuland: The high-resolution neutron time-of-flight spectrometer for r3b at fair. *Nuclear Instruments Methods in Physics Research, A*, 1014:165701, 2021.
- [7] C. Mayri, J.E. Ducret, B. Gastineau, and et al. Technical design report: Glad large acceptance dipole magnet of the r3b-collaboration at fair. Technical report, Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA/Saclay, 2011. Version 2.
- [8] D. Cortina-Gil, H. Alvarez-Pol, T. Aumann, and et al. CALIFA, a Dedicated Calorimeter for the R3B/FAIR. *Nuclear Data Sheets*, 120:99–101, 2014.
- [9] T. Yamaguchi, Y. Litvinov, H. Weick, and et al. Technical report for the design, construction and commissioning of the dual tof-detector system for ilima. Technical report, FAIR/NUSTAR/ILIMA/IMS/TDR dual TOF-Detector system, 2017.
- [10] T. Aumann, B. Jonson, and R. Lemmon et al. Technical report for the design, construction and commissioning of the califa barrel: The r3b calorimeter for in flight detection of rays and high energy charged particles. Technical report, FAIR/NUSTAR/R3B/TDR CALIFA, 2011.
- [11] T. Aumann, T. Nilsson, O. Tengblad, and et al. Technical report for the design, construction and commissioning of the califa endcap. Technical report, FAIR/NUSTAR/R3B/TDR CALIFA, 2015.

- [12] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, 4th edition, 2010.
- [13] Paul Horowitz and Winfield Hill. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 3rd edition, 2015.
- [14] M. Moszyński, M. Szawlowski, M. Kapusta, and M. Balcerzyk. Large area avalanche photodiodes in scintillation and X-rays detection. *Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section*, 485:504–521, 2002.
- [15] National Nuclear Data Center. ^{22}Na decay. https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/dec_searchi.jsp. Zugriff am 19. November 2024.
- [16] Carlos Palacio. Simplified decay scheme of the radioactive isotope ^{22}Na . https://www.researchgate.net/figure/Simplified-decay-scheme-of-the-radioactive-isotope-22-Na-22-Na-decays-to-the-excited_fig2_292334939. Zugriff am 19. November 2024.
- [17] mesytec. MPRB-16. <https://www.mesytec.com/products/nuclear-physics/MPRB-16.html>. Zugriff am 19. November 2024.
- [18] Manfred Krammer. Szintillatoren. <https://web-docs.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/V0-5-Szintillatoren.pdf>. Zugriff am: 08. Dezember 2024.