



Konzepte der Kalibration eines Prototyps des EM-Kalorimeters für $\overline{\text{PANDA}}$

Bachelor-Thesis
im Fachgebiet Experimentalphysik
Prof. Dr. Volker Metag
II. Physikalisches Institut
Universität Gießen

vorgelegt von
Wayne Lippert
aus Aßlar

Betreuer: Dr. Rainer Novotny

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	5
1.1 Das PANDA-Experiment	6
1.2 Der PANDA-Detektor	7
1.2.1 Das Konzept des elektromagnetischen Kalorimeters	7
2 Das PROTO60-Testexperiment in Mainz	9
2.1 PROTO60: Ein EMC-Prototyp	10
2.2 Mainzer Elektronenbeschleuniger und Tagger	12
2.3 Aufbau und Durchführung des Experiments	13
2.4 Konzept der Signalverarbeitung	15
3 Datenanalyse	17
3.1 Energie-Kalibration des PROTO60: Pedestal und kosmischen Myonen .	17
3.1.1 Horizontale Energieeichung	18
3.1.2 Vertikale Energieeichung	21
3.1.3 Gegenüberstellung der Kalibrationen beider Kristallorientierungen	22
3.2 Ableitung der Zeitinformation	24
3.2.1 Untersuchung des Time-Walk-Effekts	26
3.2.2 Abschätzen der Zeitauflösung	28
4 Diskussion	31
4.1 Energieeichung	31
4.2 Zeitauflösung	34
Abbildungsverzeichnis	V
Literaturverzeichnis	VII
A Daten der Energiekalibration	IX
B Daten zur Bestimmung der Zeitauflösung	XIII

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelor-Thesis wurden mit dem PROTO60, ein Prototyp des elektromagnetischen Kalorimeters des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektors, Experimente am Mainzer Mikrotron und im Gießener Institutsgebäude der II. Physik durchgeführt. Der PROTO60 besteht aus insgesamt 60 Bleiwolframatkristallen, die in einer 6×10 Matrix angeordnet und zusammen mit der entsprechenden Ausleseelektronik in ein isoliertes Plastikgehäuse eingelassen sind, um den Detektor bei einer Temperatur von $-25\text{ }^\circ\text{C}$ zu betreiben. Mit Hilfe der experimentellen Daten wurden die Kristalle hinsichtlich der Energiekalibration mittels kosmischer Myonen und ihrer Zeitauflösung untersucht.

Es wurden Energiespektren kosmischer Myonen sowohl in horizontaler als auch vertikaler Ausrichtung des PROTO60-Detektors aufgezeichnet. Die Auswertung der Daten ergab einen Unterschied in der Größe der bestimmten Eichfaktoren beider Kristallorientierungen. So sind die Eichfaktoren der Kristalle, die mit Hilfe der Energiespektren unter vertikaler Ausrichtung des Detektors bestimmt wurden, im Mittel um etwa 7,4% größer als die ermittelten Werte der horizontalen Energiekalibration. Als mögliche Ursachen werden die nicht exakte Bestimmung der von den Myonen in den Kristallen zurückgelegten mittleren Wegstrecke, der Effekt der nichtlinearen Lichtsammmlung und ein möglicher Unterschied in der Betriebstemperatur des PROTO60 während der beiden Messungen vermutet. Welchen Einfluss die erwähnten Faktoren im Speziellen auf die Energieeichung haben, bleibt in zukünftigen Experimenten noch zu überprüfen.

Am Mainzer Mikrotron wurden zudem Zeit- und Energiespektren hochenergetischer, energiemarkierter Photonen aufgezeichnet. Dabei trafen die vom Mainzer Tagger produzierten Photonen mittig auf den zentralen Kristall der 6×10 Matrix des PROTO60. Die Zeitmessung wurde durch das Tagger-Signal gestartet und durch das individuelle Signal der Kristalle gestoppt. Unter Vernachlässigung der Zeitauflösung der am Tagger benutzten Plastiksintillatoren waren somit Rückschlüsse auf die Zeitauflösung der Bleiwolframatkristalle samt Ausleseelektronik möglich. Aus den für den zentralen Kristall ausgewerteten Daten geht - in Konsistenz mit früheren Messungen - hervor, dass der Prototyp die Spezifikationen des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiments erfüllt. Ab einer Energie-deposition von rund 300 MeV liegt die Zeitauflösung im Subnanosekunden-Bereich.

Kapitel 1

Einleitung

Das GSI¹ Helmholtzzentrum soll in den nächsten Jahren um eine Beschleunigeranlage der nächsten Generation erweitert werden (Abb. 1.1). Das Projekt trägt den Namen FAIR² und schließt an die bereits bestehenden Anlagen der GSI an. Das Herzstück wird der Doppelring-Beschleuniger SIS³ 100/300, welcher hochenergetische Ionen-Strahlen sehr hoher Intensität unter anderem für die Erzeugung von Sekundärstrahlen bereitstellen wird. Diese Sekundärstrahlen - bestehend beispielweise aus radioaktiven Nukliden oder Antiprotonen - werden anschließend in Speicherringen gesammelt und dort gekühlt, um die Strahlqualität nochmals drastisch zu verbessern, bevor sie schließlich dem eigentlichen Experiment zur Verfügung gestellt werden.

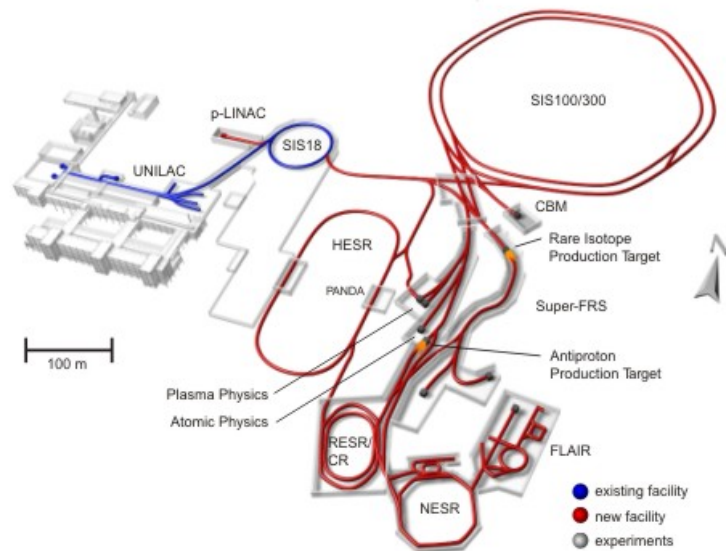


Abbildung 1.1: Gegenwärtige und geplante Anlagen der GSI in Darmstadt [GSI10]

¹GSI = Gesellschaft für Schwerionenforschung

²FAIR = Facility for Antiproton and Ion Research

³SIS = Schwerionen-Synchrotron

1.1 Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment

Eines der vielen Experimente, das am FAIR fundamentale Fragen der Physik beantworten soll, ist das im HESR⁴ befindliche $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ ⁵-Experiment. Für dieses werden zunächst Antiprotonen mit einer Rate von ca. $2 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$ am Antiprotonenseparator erzeugt und nachfolgend im Collector-Ring (CR) und dem RESR⁶ zu einem Strahl gebündelt und gekühlt. Eingespeist in den HESR wird der Antiprotonen-Strahl durch Elektronen- und stochastische Kühlung auf hohe Impulsschärfe gebracht. Die maximale Luminosität soll schließlich bei etwa $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ liegen. Die Antiprotonen treffen mit einem Impuls von 1.5 GeV/c bis 15 GeV/c auf ein Wasserstoff-Fixtarget und stellen somit eine Schwerpunktsenergie von bis zu 5.5 GeV/c bereit. Mit Hilfe des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektors können daher insbesondere schwere hadronische Zustände (z.B. Charmonium ($c\bar{c}$)) hochpräzise spektroskopiert und verschiedene Aspekte der Starken Wechselwirkung (QCD⁷) experimentell überprüft werden (Abb. 1.2). Diese sagt unter anderem die Existenz farbladungsneutraler Zustände voraus, die nur aus Gluonen und Seequarks bestehen (sogenannte Glueballs), bislang aber noch nicht eindeutig experimentell nachgewiesen worden sind. Aber auch elektroschwache und elektromagnetische Prozesse gehören zum physikalischen Programm des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiments. Um die Antiproton-Proton-Wechselwirkung wirklich präzise zu vermessen, wird ein enorm leistungsfähiger Detektor benötigt, der geladene und ungeladene Teilchen in einem 4π -Raumwinkel zuverlässig detektieren und identifizieren kann.

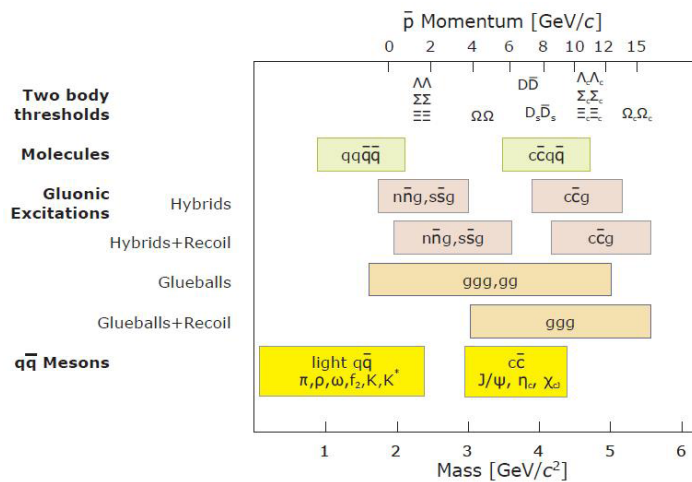


Abbildung 1.2: Zustände in Abhängigkeit des Antiprotonenimpulses [TPR05]

⁴HESR = High Energy Storage Ring

⁵ $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ = Anti-Proton Annihilation at Darmstadt

⁶RESR = Recycled Experimental Storage Ring

⁷QCD = QuantenChromodynamik

1.2 Der \bar{P} ANDA-Detektor

Um den Anforderungen eines Fixtarget-Experiments gerecht zu werden, ist der Detektor des \bar{P} ANDA-Experiments asymmetrisch konzipiert. Er setzt sich zusammen aus einem Target-Spektrometer und einem Forward-Spektrometer, welches den Kleinwinkelbereich in Vorwärtsrichtung abdeckt. In beiden Spektrometern sind die zur Teilchenidentifikation sowie zur Spur-, Energie- und Zeitrekonstruktion erforderlichen Systeme implementiert, um den Nachweis des kompletten, relevanten Spektrums des \bar{P} ANDA Physik-Programms zu gewährleisten. In Abbildung 1.3 ist der Detektor schematisch dargestellt.

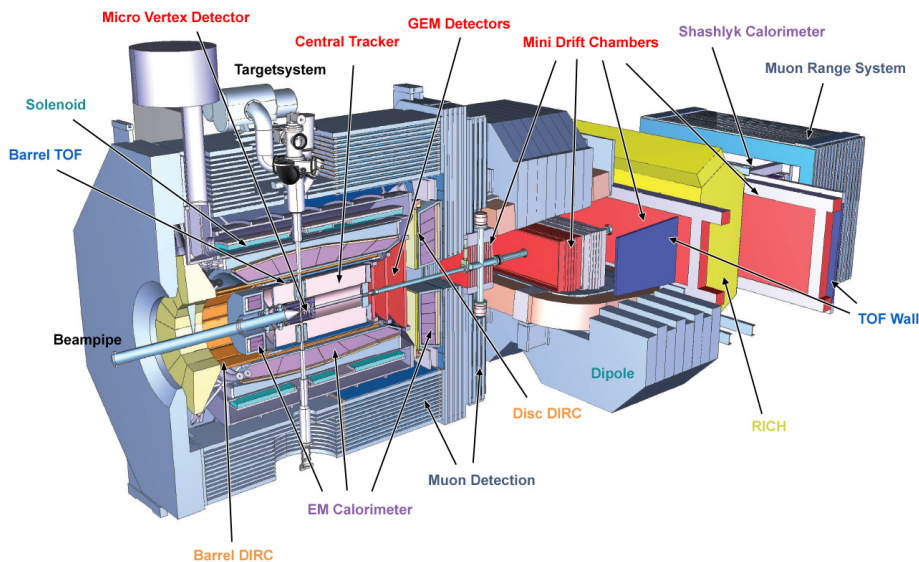


Abbildung 1.3: Konzeptionelle Gesamtansicht des \bar{P} ANDA-Detektors [PAN10]

1.2.1 Das Konzept des elektromagnetischen Kalorimeters

Die zentrale Detektorkomponente zum präzisen und effizienten Nachweis elektromagnetischer Proben ist das EMC⁸ (Abb. 1.4) des \bar{P} ANDA-Detektors. Es muss anspruchsvolle Spezifikationen erfüllen. So soll es unter anderem ein kompaktes Design aufweisen und dennoch die erwarteten hohen Zählraten unter Gewährleistung einer guten Energieauflösung bewältigen können.

⁸EMC = Electromagnetic Calorimeter

Bei einer geschätzten Energiedosis von 20-30 mGy/h unter kleinen Vorwärtswinkeln bezüglich der Strahlachse muss das verwendete Szintillatormaterial zusätzlich eine hohe Strahlungshärte aufweisen. Man verwendet Bleiwolframatkristalle (PbWO_4), die sich bereits in den Experimenten ALICE⁹ und CMS¹⁰ am LHC¹¹ bewährt haben. Diese sogenannten PWO Kristalle zeichnen sich besonders durch eine kurze Abklingzeit des Szintillationslichts (< 10 ns) und einen kleinen Moliere-Radius (ca. 2.0 cm) aus. Sie wurden inzwischen beständig weiterentwickelt, so dass im EMC insgesamt 15552 Bleiwolframatkristalle der zweiten Generation (PWO-II Kristalle) eingesetzt werden, deren Lichtausbeute im Vergleich zu Standard PWO ungefähr doppelt so groß ist. Die PWO-II Kristalle sind 20 cm lang, was in etwa der 22-fachen Strahlungslänge X_0 entspricht. Das EMC selbst besteht aus einem Backward End-Cap (592 Kristalle), einem Forward End-Cap (3600 Kristalle) und einem zylinderförmigen, segmentiertem Barrel, welches insgesamt 11360 Kristalle umfasst. Hohe Energie-, Orts- und Zeitauflösung sind gefordert, um Photonen über einen großen dynamischen Messbereich von 10 MeV bis 14.6 GeV nachzuweisen und somit die Rekonstruktion der vorangegangenen Zerfallsprozesse zu ermöglichen. Durch Kühlung der Kristalle auf -25 °C kann man die Lichtausbeute im Vergleich zu einem Betrieb des Kalorimeters bei $+25$ °C um den Faktor 4 erhöhen [EIS09]. Diese Verbesserung der Photonenstatistik führt zu einer um den Faktor 2 besseren Energieauflösung. Da sich das Kalorimeter in einem äußeren Magnetfeld ($B \approx 2$ T) befindet, werden die Szintillatoren mit LAAPDs¹² anstatt mit Photomultipliern ausgelesen.

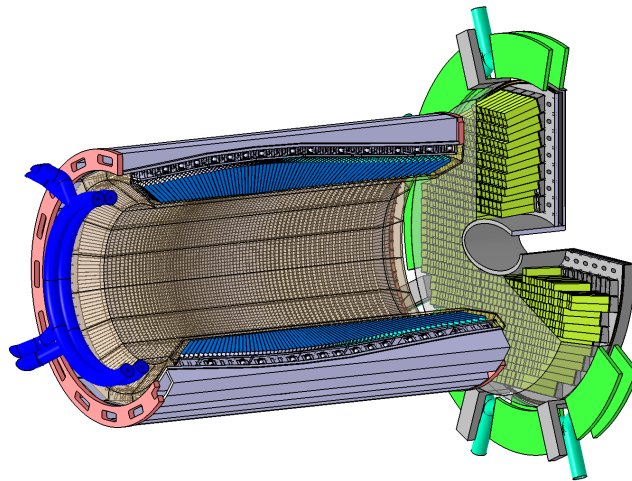


Abbildung 1.4: Barrel und Forward End-Cap des EMC [TDR08]

⁹ALICE = A Large Ion Collider Experiment

¹⁰CMS = Compact Muon Solenoid

¹¹LHC = Large Hadron Collider

¹²LAAPD = Large Area Avalanche Photodiode

Kapitel 2

Das PROTO60-Testexperiment in Mainz

Um das Konzept des elektromagnetischen Kalorimeters für $\bar{\text{PANDA}}$ auf die Erfüllung der vorgegebenen Spezifikationen vorab zu überprüfen und weiterzuentwickeln, sind Experimente mit einem Prototypen essentiell. Ein solcher repräsentiert einen kleinen Teil des tatsächlichen Kalorimeters und kann daher in Experimenten nützliche Daten für dessen Optimierung liefern. Im Rahmen dieser Bachelor-Thesis wurde ein Testexperiment mit dem PROTO60-Prototypen am MAMI¹ durchgeführt. Dort können am sogenannten Tagger (Halle A2, Abbildung 2.1) hochenergetische, energiemarkierte Photonen mittels Elektronenbremsstrahlung erzeugt und für das Experiment bereitgestellt werden.

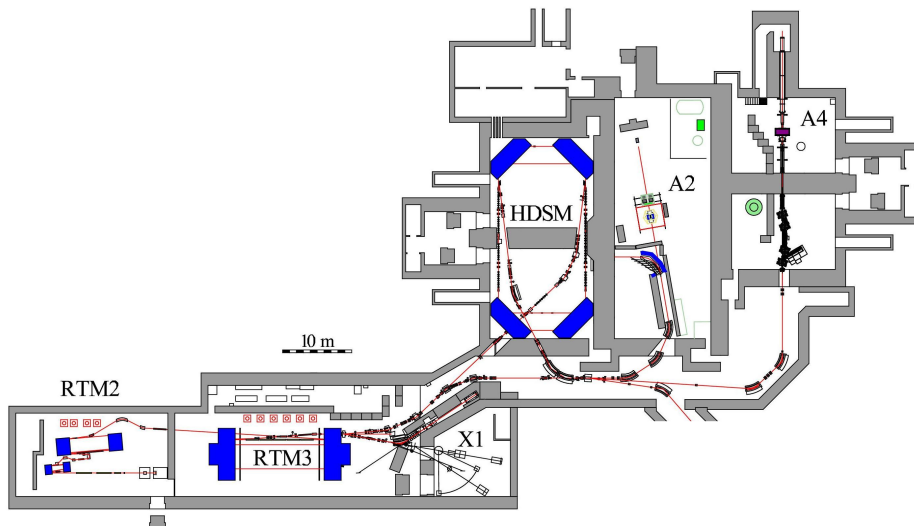


Abbildung 2.1: Ausschnitt der Beschleunigeranlage in Mainz [IFK10]

¹MAMI = Mainzer Mikrotron

2.1 PROTO60: Ein EMC-Prototyp

Der PROTO60-Detektor stellt eine Untereinheit des EMC-Barrels dar und beinhaltet insgesamt 60 PWO-II Kristalle in Typ 6 Geometrie (Tabelle 2.1 und Abbildung 2.4), die in einer 6x10-Matrix angeordnet sind. Die verwendeten Kristalle sind 20 cm lang und pyramidenstumpfförmig sowie zudem von der Reflektorfolie VM2000 umschlossen, um die Lichtausbeute zusätzlich zu steigern. Jeweils vier solcher Kristalle sind mit Mylarfolie zu einem Verbund zusammengeschlossen und in Alveolen aus Kohlefaser eingefasst, die als Halterung der Kristalle dienen und mechanische Belastungen auffangen sollen. Die einzelnen Kristallebenen sind gemäß der Barrel-Geometrie gegeneinander versetzt und leicht gedreht in ein Gehäuse eingelassen (Abbildung 2.2), welches aus Kunststoff besteht. Für die Kühlung des PROTO60 auf -25 °C wird ein Ethanol-Wasser-Gemisch verwendet. Um zu verhindern, dass sich innerhalb des Prototyps Eiskristalle ausbilden, wird der Aufbau mit Trockenstickstoff durchflutet, wodurch die Luftfeuchtigkeit signifikant herabgesenkt wird. Der vordere Teil des PROTO60 besteht aus zwei kohlefasergestützten Aluminiumplatten, zwischen denen sich ein Vakuum befindet. Das minimiert Wärmeleitungsprozesse und erhöht daher die thermische Isolierung. Die Umwandlung des Szintillationslichts in Ladungsimpulse erfolgt mit Hilfe $1 \times 1\text{ cm}^2$ großer LAAPDs (Hamamatsu, Typ 8664-1010SPL), von denen jeweils eine auf der Rückseite der Bleiwolframatkristalle angebracht und mit Silikonöl optisch mit selbigen verbunden ist. Für das EMC des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiments sind jeweils zwei LAAPDs pro Kristall vorgesehen. An jedem Kristallverbund ist ein Vierfach-Vorverstärker des Typs SP883b angekoppelt, der die Ladungsimpulse in Spannungsimpulse konvertiert und an die Auslese-Elektronik weitergibt. Die Kristalle des Prototyps sind wie in Abbildung 2.3 nummeriert.

Länge [cm]	AF [cm]	BF [cm]	CF [cm]	AR [cm]	BR [cm]	CR [cm]
20	2,119	2,128	2,178	2,672	2,722	2,747

Tabelle 2.1: $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Typ 6 Kristalldimensionen

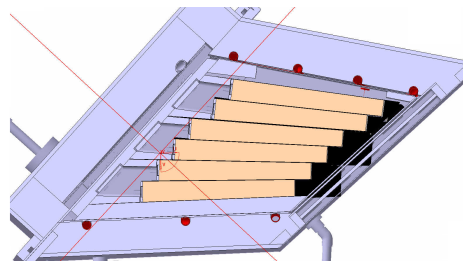


Abbildung 2.2: Querschnitt durch die Seitenansicht des PROTO60 [MOR09]

10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
40	39	38	37	36	35	34	33	32	31
50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
60	59	58	57	56	55	54	53	52	51

Abbildung 2.3: Nummerierung der Kristalle aus der Strahlperspektive

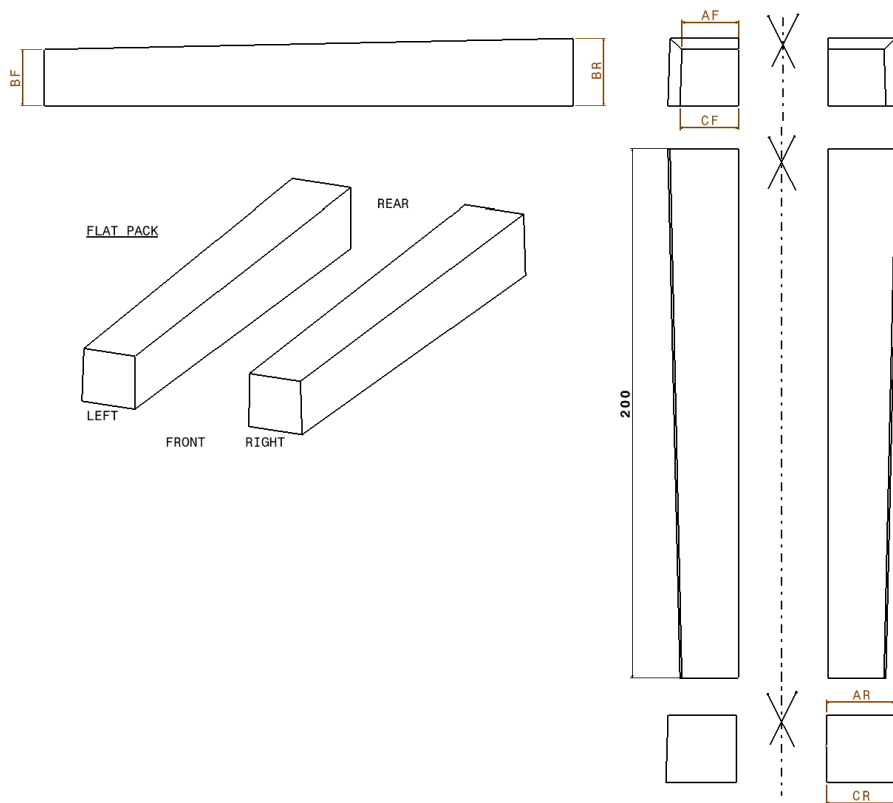


Abbildung 2.4: Geometrie der Kristalle des \bar{P} ANDA Barrel-EMC [TDR08]

2.2 Mainzer Elektronenbeschleuniger und Tagger

Die Elektronen-Beschleunigeranlage auf dem Gelände der Mainzer Universität besteht aus vier Stufen. Zunächst injiziert ein LINAC² Elektronen mit einer Energie von 3,5 MeV in den ersten von drei kaskadierten Rennbahn-Mikrotrons. In diesen werden die Elektronen durch zwei Dipolmagnete auf durch einseitige Linearbeschleunigung immer größer werdende Bahnen gezwungen. Die Elektronen gewinnen pro Umlauf einen festen Energiewert ΔE und werden schließlich nach Erreichen der Maximalenergie in die nächste Beschleunigerstufe extrahiert. Als Beispiel sei das RTM3 aufgeführt, dort wird die Elektronenenergie in $\Delta E = 15$ MeV Schritten von 180 MeV bis auf $E_{max} = 855$ MeV gesteigert. Betrieben werden alle drei RTMs³ bei einer Frequenz von 2,45 GHz. Ein HDSM⁴ bildet die letzte der vier Stufen. Im Unterschied zu den drei vorgeschalteten RTMs besteht es aus vier 90°-Ablenkmagneten und zwei auf den gegenüberliegenden langen Seiten befindlichen LINAC-Strukturen (Betriebsfrequenzen 2,45 GHz bzw. 4,90 GHz). Durch das harmonische doppelseitige Mikrotron können die Elektronen zusätzlich auf Energien zwischen 855 MeV bis 1508 MeV gebracht und abschließend in die weiteren Anlagen extrahiert werden. So auch unter anderem in den Glasgow Mainz Tagger (Abb. 2.5), an dem die für das Testexperiment nötigen Photonen durch Elektronenbremsstrahlung erzeugt werden. Als Radiator verwendet man eine dünne Kupferfolie. Treffen die Elektronen auf das Metall, so werden sie (hauptsächlich) im Coulomb-Feld des Nukleons beschleunigt und strahlen gemäß der Maxwell-Gleichungen elektromagnetische Wellen ab. Da der Energieübertrag auf den Atomkern vernachlässigbar klein ist, besitzen die abgestrahlten Photonen die Energie, die der Energiedifferenz der Elektronen vor und nach dem Durchgang durch die Kupferfolie entspricht. Um die Energie der Photonen zu bestimmen, befindet sich im Anschluss an das Kupfer-Target ein Dipolmagnet. Mit ihm können die Elektronen nach ihrem Impuls separiert werden. Mit Hilfe der insgesamt 352, sich paarweise überlappenden 24 mm breiten Plastiksintillatoren lässt sich nachfolgend der Auftreffpunkt der Elektronen auf der Fokalebene bestimmen. Daraus ist der Elektronen-Restimpuls und somit die entsprechende Photonenenergie zu berechnen. Geeignete Koinzidenzmessungen zwischen Tagger und Detektor erlauben letztendlich in Experimenten die Zuordnung der Energien der detektierten Photonen. Elektronen, die keine Energieverluste durch Bremsstrahlung erfahren, werden zum Strahlfänger gelenkt. Zu erwähnen ist noch, dass ein im Abstand von etwa 250 cm vom Radiator positionierter Kollimator sicherstellt, dass der Strahlfleck der Photonen auf dem Detektortarget hinreichend klein wird. Für unser Experiment wurde das RTM3 als letzte Beschleunigerstufe genutzt. Dadurch können am Tagger energiemarkierte Photonen bis zu einer Energie von 855 MeV (mit einer Genauigkeit von etwa 2 MeV) produziert werden.

²LINAC = Linear Accelerator

³RTM = Racetrack Microtron

⁴HDSM = Harmonic Double Sided Microtron

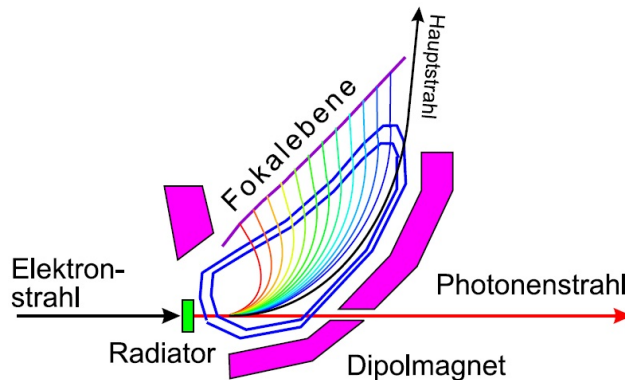


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Tagger-Spektrometers

2.3 Aufbau und Durchführung des Experiments

Für das Experiment am Mainzer Mikrotron wurde der PROTO60-Versuchsaufbau in Halle A2 zwischen Crystal-Ball und TAPS⁵ positioniert. Der Aufbau umfasste folgende Komponenten: PROTO60, X-Y-Gestell, Spannungsversorgung für die Vorverstärker, Hochspannungsversorgung für die LAAPDs, Flasche mit trockenem Stickstoffgas, Vakuumpumpe für das Eintrittsfenster, Kühlaggregat zur Kühlung des Prototyps und die benötigte Auslese-Elektronik. Nachdem der Prototyp auf die Temperatur von -25 °C heruntergekühlt wurde, war die 6×10 Kristallmatrix des PROTO60 so auszurichten, dass die Tagger-Photonen mittig auf Kristall 35 (im Folgenden auch mit „zentraler Kristall“ bezeichnet) auftreffen. Dafür wurde der Detektor zunächst mittels einer an ihm angebrachten Markierung vorjustiert und anschließend unter Verwendung der Schrittmotorsteuerung des X-Y-Gestells in seine endgültige Position gebracht (Abb. 2.6). Für das Experiment wurden aus dem Spektrum des Mainzer Taggers 16 verschiedene Photonenenergien ausgewählt (Tabelle 2.2). Die verwendeten Energie- und Zeitspektren stammen aus der vierten Messung, in welcher der Detektor über eine Zeitdauer von 170 Minuten bestrahlt wurde.

Die Daten zur Energie-Eichung wurden zwei separaten Messungen kosmischer Strahlung entnommen. Dafür wurde der PROTO60 sowohl für eine Dauer von 25 Stunden horizontal (Messung in Mainz) als auch für einen Zeitraum von ca. 3 Wochen vertikal (Messung im Gießener Institutsgebäude) ausgerichtet und die entsprechenden Energiespektren aufgenommen. Zur Bestimmung der jeweiligen Pedestalposition lief während der gesamten Messzeit in Mainz und Gießen ein Testpulsor mit einer Rate zwischen 0,5 Hz und 1 Hz.

⁵TAPS = Two Arms Photon Spectrometer

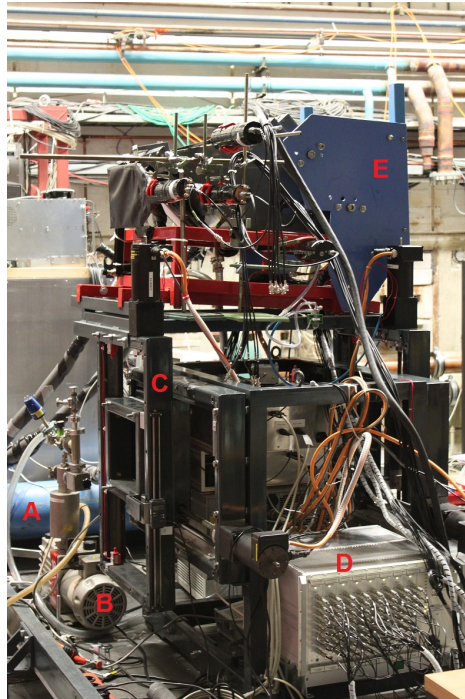


Abbildung 2.6: PROTO60 Versuchsaufbau in Mainz; zu sehen sind: Flasche mit trockenem Stickstoffgas (A), Vakuumpumpe (B), X-Y-Gestell (C), Hochspannungsversorgung (D), PROTO60 (E)

Tagger-Kanal	Energie E_γ [MeV]	Tagger-Kanal	Energie E_γ [MeV]
1	685,58	9	269,95
2	650,81	10	200,35
3	601,77	11	152,72
4	579,10	12	107,98
5	509,88	13	93,97
6	443,77	14	84,67
7	387,38	15	61,54
8	339,67	16	52,34

Tabelle 2.2: Interne Kanal-Nummerierung und zugehörige Photonen-Energien

2.4 Konzept der Signalverarbeitung

Wenn zum Beispiel Photonen oder Myonen Energie in einem der Bleiwolframatkristalle deponieren, so emittiert dieser Szintillationslicht, dessen Menge im dynamischen Bereich proportional zur deponierten Energie ist. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wird das Szintillationslicht der Kristalle in elektrische Signale konvertiert und an die Auslese-Elektronik weitergegeben. Die bereits vorverstärkten Spannungsimpulse werden nun von MSCF16-Modulen (einer Kombination aus Spektroskopieverstärker und CFD⁶) integriert und anschließend mittels gategesteuerter Peaksensing-ADC⁷-Module digitalisiert. Dafür stehen pro ADC 3860 Kanäle zur Verfügung. Eine schematische Ansicht der Auslese-Elektronik während des Experiments zeigt Abbildung 2.7. Für die Erzeugung der Gates ist das ODER der 16 Tagger-Kanäle koinzident mit dem ODER der 60 Kristalle des Prototyps verschaltet. Die Gates des Testpulsers hingegen werden mit einer konstanten Rate von 0,5 bis 1 Hz parallel zur eigentlichen Messung generiert. Die zuvor erwähnten Gatesignale des Taggers dienen ebenfalls als Zeitreferenz und werden den TDCs⁸ als gemeinsames Startsignal bereitgestellt. Man spricht in diesem Fall von einem „Common-Start“. Als individuelles Stoppsignal dient den TDCs das mit Hilfe von Delays um 500 ns verzögerte Signal der MSCF16-Module. Anhand der durch diese Signalverarbeitung gewonnenen Zeitinformationen der Kristalle sind Rückschlüsse auf die Zeitauflösung des PROTO60 möglich.

Für die Signalauslese der durch kosmische Myonen im Kristall deponierten Energie wird bei dem horizontalen Versuchsaufbau ein Gate generiert, falls Kristalle der obersten und untersten Reihe der 6x10 Matrix koinzident ansprechen. Bei vertikaler Ausrichtung des PROTO60 erfolgt eine Weiterverarbeitung der Kristallsignale, wenn ein Signal registriert wird, welches eine gewisse Schwelle übersteigt, die außerhalb des elektronischen Rauschens liegt. Dadurch verwirft man in beiden Fällen mit Hilfe der Hardware bereits Ereignisse, die nicht zur Energieeichung beitragen sollen. Des Weiteren werden alle Daten ereignisweise gespeichert.

Eine schematische Ansicht des Aufbaus der Auslese-Elektronik des Experiments am Tagger in Mainz zeigt Abbildung 2.7.

⁶CFD = Constant Fraction Discriminator

⁷ADC = Analog to Digital Converter

⁸TDC = Time to Digital Converter

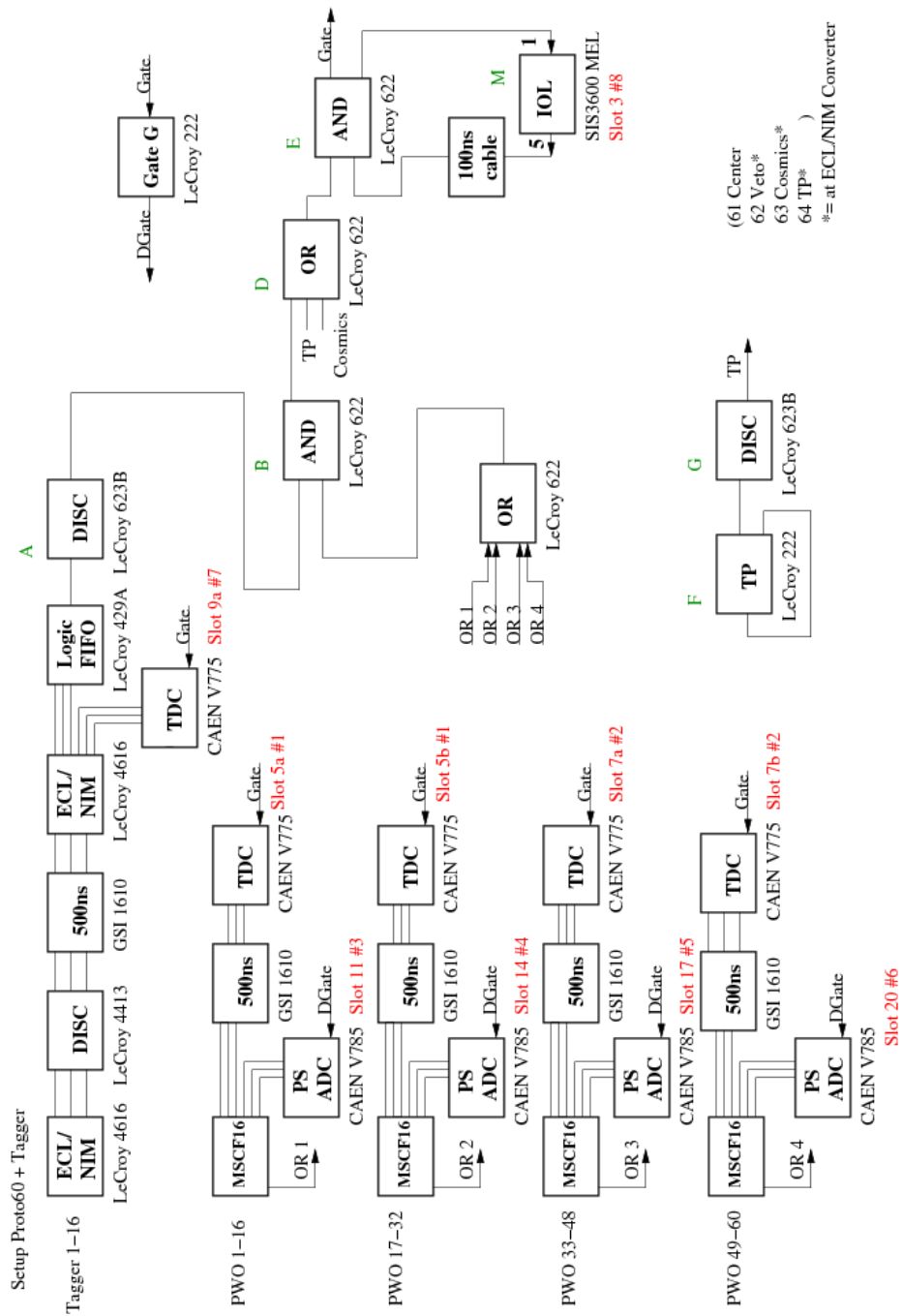


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Auslese-Elektronik

Kapitel 3

Datenanalyse

3.1 Energie-Kalibration des PROTO60: Pedestal und kosmischen Myonen

Im dynamischen Bereich des PROTO60 besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der in einem Kristall deponierten Energie und der Kanalnummer des entsprechenden ADCs. Für die Energie-Kalibration werden daher mindestens zwei Wertepaare $(x, y) = (\text{ADC-Kanal}, \text{Energie})$ benötigt, um einen Eichfaktor zu bestimmen, mit dem jedem Kanal ein gewisser Energiewert zugeordnet werden kann. Er ergibt sich aus den beiden Wertepaaren zu:

$$E_{\text{Kanal}} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3.1)$$

Für Experimente im niederenergetischen Bereich verwendet man beispielsweise radioaktive Eichpräparate zur Kalibrierung des Detektors. Da während der Experimente in Mainz und im zukünftigen PANDA-Experiment hochenergetische Photonen über einen großen Energiebereich zu detektieren sind, ist es sinnvoll Energie-Referenzwerte zu benutzen, die über den üblichen Energiebereich radioaktiver Präparate von einigen wenigen MeV hinausgehen. Dafür eignet sich zum Beispiel das Konzept der Kalibration mit Hilfe kosmischer Myonen (sogenannte „Cosmics“). Diese werden als Sekundärteilchen beim Anschauen energiereicher Atomkerne in der Atmosphäre produziert. Das Myon entsteht hauptsächlich aus dem Zerfall eines Pions:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \text{bzw.} \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (3.2)$$

Der dominante Wechselwirkungsprozess kosmischer Myonen mit Materie ist die elektromagnetische Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen der Atome. Der dabei auftretende Energieverlust der Myonen pro zurückgelegter Wegstrecke in den Kristallen wird in diesem Energiebereich ausreichend gut durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben. Kosmische Myonen sind minimalionisierend, d.h. ihr Energieverlust in Materie pro Weglänge ist in erster Näherung konstant.¹ Somit kann die im Kristall deponierte Energie E_μ der Myonen unter Kenntnis der zurückgelegten Wegstrecke berechnet werden. Da die Verteilung der Häufigkeiten im Energiespektrum durch eine Landau-Funktion beschrieben werden kann, liefert die Position x_μ des MPV² eines Landau-Fits den ADC-Kanal, dem diese Energiedeposition E_μ zugeordnet werden kann. Einen weiteren Eichpunkt (ADC-Kanal, Energie) gewinnt man aus der Bestimmung des Pedestals. Als Pedestal-Position x_{ped} wird der ADC-Kanal bezeichnet, welcher dem Energie-Nullwert entspricht. Diese Kanalnummer ist üblicherweise ungleich Null, da die Mess-Signale stets von elektronischem Rauschen überlagert sind. Die Pedestalposition ergibt sich aus einem Gauß-Fit des vom Testpuls erzeugten Signals. Für den Eichfaktor F folgt:

$$F = \frac{E_\mu}{x_\mu - x_{ped}} \quad (3.3)$$

Mit ihm lassen sich die PWO-II Kristalle des PROTO60 über

$$E(x) = F \cdot (x - x_{ped}) \quad (3.4)$$

in einem Schritt relativ zueinander und auch absolut kalibrieren.

3.1.1 Horizontale Energieeichung

Für die horizontale Energieeichung wurden die Spektren kosmischer Myonen unter waagrechter Ausrichtung des PROTO60 aufgezeichnet und die Energie-Verteilungen anschließend mit Landau-Funktionen gefittet. Für die Auswertung der Spektren wurden nur solche Daten verwendet, bei denen alle Kristalle einer bestimmten Spalte der 6x10-Matrix koinzident angesprochen (Eintrag in ADC-Kanal 150 und größer) haben. Durch die Koinzidenzbedingung wurde die Variation der Wegstrecke, welche die Myonen in den Bleiwolframatkristallen zurücklegen, stark eingeschränkt. Aus geometrischen Überlegungen folgt als Wert für die mittlere Wegstrecke eine Länge von 2,4032 cm [MOR09]. Die Abweichung der leicht gegeneinander gedrehten Kristallebenen von diesem Mittelwert wird als vernachlässigbar angenommen (Abb. 3.1).

Da minimalionisierende Myonen in Bleiwolframat pro cm eine Energie von 10,2007 MeV verlieren [PDG10], kann der Peak-Position des Landau-Fits eine Energie von $E_\mu = 24,514$ MeV zugeordnet werden.

¹ $dE/dx \approx 1,5 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^{-2} \cdot \rho$

²MPV = Most Probable Value

3.1 Energie-Kalibration des PROTO60: Pedestal und kosmischen Myonen

Die Daten zur horizontalen (wie auch vertikalen) Energie-Kalibration befinden sich im Anhang in Tabelle A.1. Für die gesamte Datenanalyse wurde das am CERN entwickelte Analyse-Paket ROOT benutzt. Kristall 32 war während der Messung in Mainz nicht korrekt verkabelt, daher wurden für ihn keine Messwerte aufgenommen. Abbildung 3.2 zeigt einen Gauß-Fit des Testpulser-Spektrums von Kristall 9 zur Bestimmung der Pedestal-Position. Energiespektren kosmischer Myonen des Kristalls 26 sind den Abbildungen 3.3, 3.4 und 3.5 zu entnehmen.

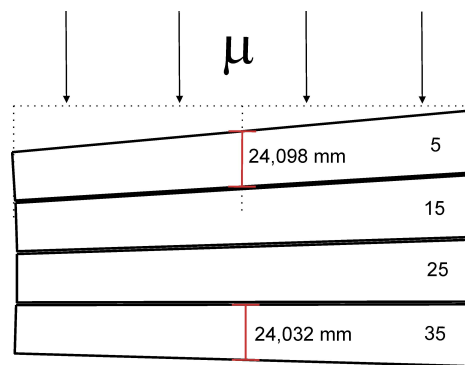


Abbildung 3.1: Wegstrecken der Myonen bei horizontaler Orientierung des PROTO60 [MOR09]

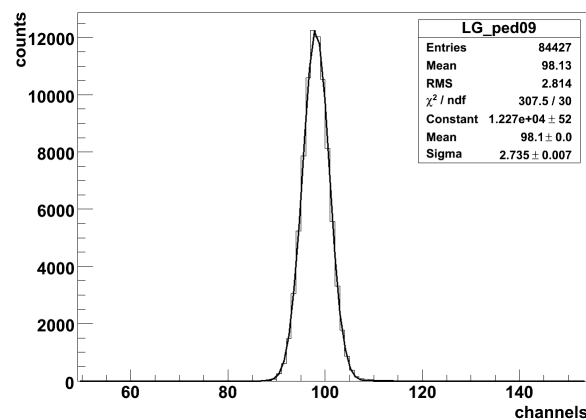


Abbildung 3.2: Testpulser-Spektrum des Kristalls 9 mit Gauß-Fit

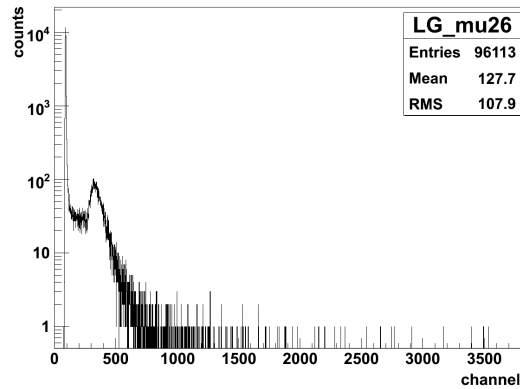


Abbildung 3.3: Rohdaten der nachgewiesenen Myonen in Kristall 26 (K26)

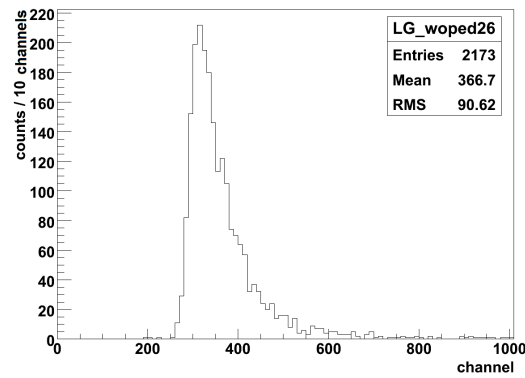


Abbildung 3.4: Energiespektrum kosm. Myonen mit Koinzidenzbedingung (K26)

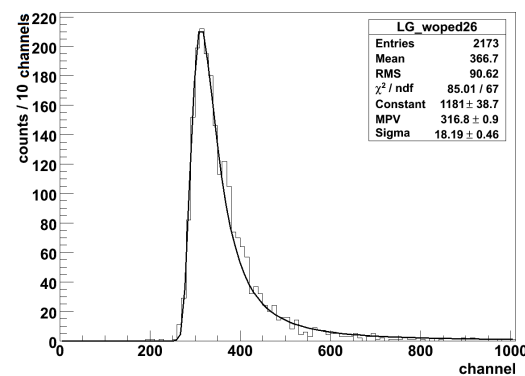


Abbildung 3.5: Fit der Verteilung mit einer Landau-Funktion (K26)

3.1.2 Vertikale Energieeichung

In Gießen wurden Energiespektren kosmischer Myonen bei vertikaler Ausrichtung des PROTO60 aufgenommen. Die Schwelle des Hardware-Triggers wurde für jeden der Kristalle auf eine Energie von 30-40 MeV gesetzt. Für die Bestimmung der Eichfaktoren wurden solche Ereignisse verwendet, bei denen nur jeweils einer der 60 PWO-II Kristalle des Detektors ein durch kosmische Myonen erzeugtes Mess-Signal registrierte. Ein Eintrag im ADC-Spektrum eines Kristalls wurde genau dann als echtes Signal gewertet, wenn dieser mehr als drei Standardabweichungen von der ADC-Kanalnummer des Pedestals entfernt war. Durch diese Bedingung lieferten nur solche kosmische Myonen Beiträge, die einen einzelnen Kristall in seiner vollen Länge von 20 cm durchquerten (Abbildung 3.6). Abweichungen von dieser Wegstrecke, die durch nicht exakt senkrecht zur vorderen Kristallfläche einfallende Myonen entstanden, sind minimal und wurden vernachlässigt. Damit korrespondiert die Position des MVP bei der vertikalen Energiekalibration mit einem Energiewert von 204,014 MeV. Eine Auswertung der Spektren war für die Kristalle 13, 14, 49, 50, 55, 56 wegen einer zu geringen Statistik nicht möglich. Aufgrund der Verlagerung des PROTO60-Versuchsaufbaus von Mainz nach Gießen wurden parallel zur Messung der kosmischen Myonen neue Testpulser-Spektren aufgenommen, mit denen die für die vertikale Eichung benötigten Positionen der Pedestals bestimmt wurden.

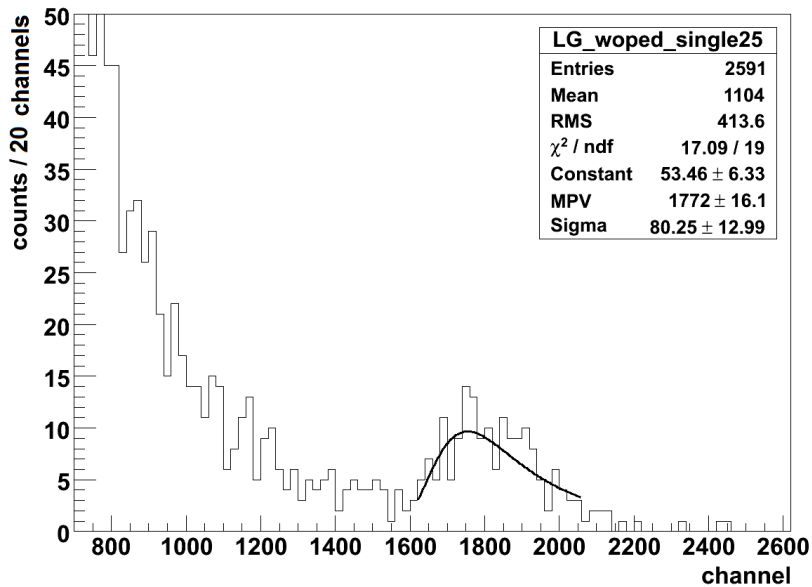


Abbildung 3.6: Fit der Verteilung kosm. Myonen von Kristall 25 zur vertikalen Energiekalibration

3.1.3 Gegenüberstellung der Kalibrationen beider Kristallorientierungen

Die Energie-Kalibrationen beider Kristallorientierungen lassen sich über die ermittelten Eichfaktoren vergleichen. Da das Pedestal nur ein elektronischer Offset ist, der in der Kalibration herausgerechnet wird, spielt es in der folgenden Gegenüberstellung keine Rolle. Nimmt man an, dass die durch kosmische Myonen im Bleiwolframatkristall deponierte Energie für beide Kristallorientierungen verlustfrei in elektrische Signale konvertiert wird, erwartet man, dass die Eichfaktoren der horizontalen (F_h) und vertikalen (F_v) Eichung denselben Wert besitzen. In Abbildung 3.7 ist deshalb das Verhältnis F_v zu F_h aller 53 horizontal und vertikal ausgewerteten Kristalle grafisch gegen die Kristall-Nummer aufgetragen (siehe Tabelle A.2). Die Grafik enthält außerdem einen Fit der Datenpunkte mit einer konstanten Funktion, deren Wert $c = 1.074$ beträgt und dem Mittelwert der Verhältnisse entspricht. Zu erkennen ist also, dass die Eichfaktoren der vertikalen Kalibration die Eichfaktoren der horizontalen Eichung im Mittel um etwa 7,4% übersteigen.

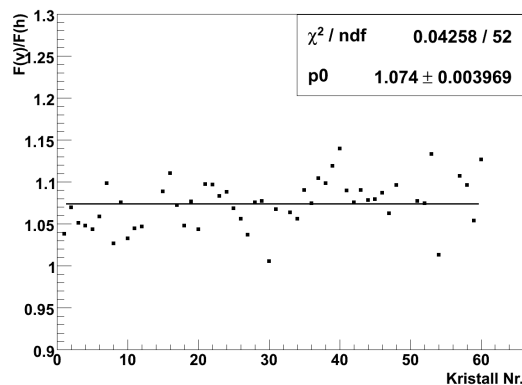


Abbildung 3.7: Verhältnis F_v/F_h für die einzelnen Kristalle des PROTO60

Will man in Experimenten die Gesamtenergie eines Teilchens oder γ -Quants rekonstruieren, so sind vor allem der zentrale Kristall und die Kristalle um den Auftreffpunkt von enormer Bedeutung. In ihnen wird ein Großteil der Schauer-Energie deponiert. Der Photonenstrahl des Mainzer Taggers war während des Experiments auf Kristall 35 justiert. Daher ist die relative Abweichung der Eichfaktoren der den zentralen Kristall einschließenden 3×3 Matrix von besonderem Interesse, um grobe Fehler bei der Energierekonstruktion des Experiments in Mainz auszuschließen. Diese beträgt im Mittel 7,5% und unterscheidet sich damit also nicht signifikant von der mittleren Abweichung der gesamten 6×10 Matrix. Die möglichen Ursachen für die Diskrepanz der Eichfaktoren für die verschiedenen Kristallorientierungen werden in Kapitel 4 diskutiert.

3.1 Energie-Kalibration des PROTO60: Pedestal und kosmischen Myonen

Mit den Abbildungen 3.8 und 3.9 sind exemplarisch zwei Energiespektren kosmischer Myonen aufgeführt, die während der horizontalen Messung generiert wurden. Zu erkennen ist, dass der Peak des Spektrums mit horizontaler Energieeichung bei einer Energie von 24,5 MeV liegt, wohingegen dem Peak mit vertikaler Eichung eine etwas größeren Energie zugeschrieben wird. Diese Verschiebung der Spektren gegeneinander ist durch die unterschiedlich großen Eichfaktoren zu erklären. Die absolute Abweichung der beiden Eichungen wächst mit der Größe der im Kristall deponierten Energie.

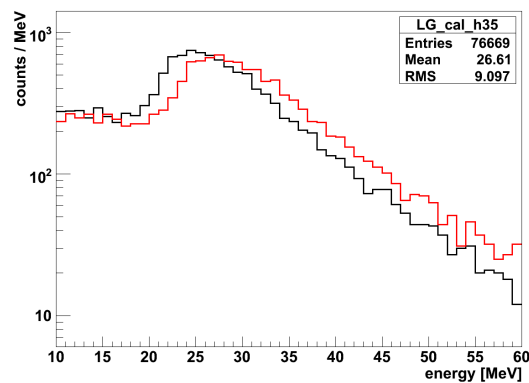


Abbildung 3.8: Energiespektrum des Kristalls 35 mit horizontaler (schwarz) und vertikaler (rot) Eichung

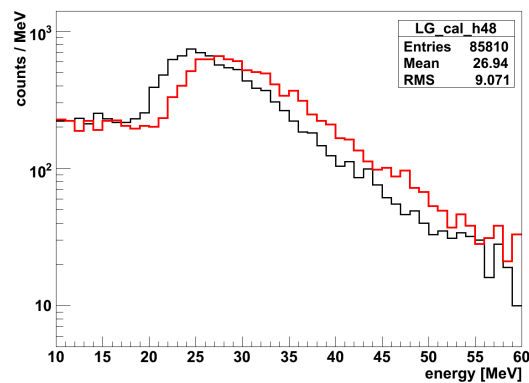


Abbildung 3.9: Energiespektrum des Kristalls 48 mit horizontaler (schwarz) und vertikaler (rot) Eichung

3.2 Ableitung der Zeitinformation

Um die Bleiwolframatkristalle auf die Erfüllung ihrer Spezifikationen zu überprüfen, wurden im Anschluss an die vierte Messung in Mainz die 16 Energie- und Zeitspektren des zentralen Kristalls ausgewertet. Während des Experiments wurde die Zeitmessung durch das Signal des Plastiksintillators des jeweiligen Tagger-Kanals gestartet und durch das Signal des Kristalls 35 wieder gestoppt:

$$t = t_{\text{Stopp}} - t_{\text{Start}} = t_{K35} - t_{\text{Plastik}} \quad (3.5)$$

Der Fehler dieser Messung ergibt sich formal aus dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz zu:

$$\Delta t = \sqrt{(\Delta t_{K35})^2 + (\Delta t_{\text{Plastik}})^2} \quad (3.6)$$

Dieser Fehler soll im Folgenden ermittelt werden, da sich mit ihm Aussagen über die erreichbare Zeitaufösung der PWO-II Kristalle machen lassen.

In Mainz wurden zusätzlich Zeitspektren für die 16 Tagger-Kanäle angelegt (Abbildung 3.10). Die Zeitmessung wurde, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, gestartet und mit dem durch ein festes Delay verzögerten Signal des entsprechenden Tagger-Kanals wieder gestoppt. In den Zeitspektren ist also jeweils ein scharfer Peak zu erwarten. Von diesem Peak abweichende Einträge stammen von zufälligen Koinzidenzen der ausgewählten Tagger-Kanäle. Durch das Zuschneiden der einzelnen Zeitspektren auf eine kleine Umgebung um den Peak konnten diese Koinzidenzen aus den Energiespektren des Kristalls 35 entfernt werden. Da die selektierten Kanäle nur einen kleinen Teil des gesamten Energiebereichs der Photonen des Mainzer Taggers abdecken, konnten dadurch aber nicht alle Mehrphotonenereignisse beseitigt werden.

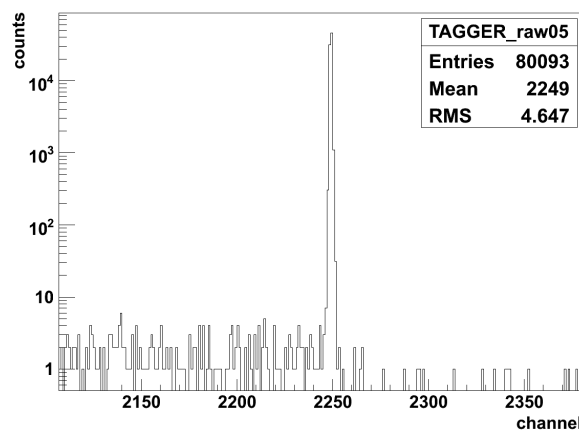


Abbildung 3.10: Zeitspektrum des Tagger-Kanals 5

Die so bereinigten Energiespektren des zentralen Kristalls wurden anschließend zuerst mit Hilfe der horizontalen Eichung kalibriert und die erhaltenen Verteilungen mit Gauß-Funktionen gefittet (Abbildung 3.11). Mittelwerte (\bar{E}) und Standardabweichungen (σ_E) sind in Tabelle B.1 zusammengefasst im Anhang zu finden.

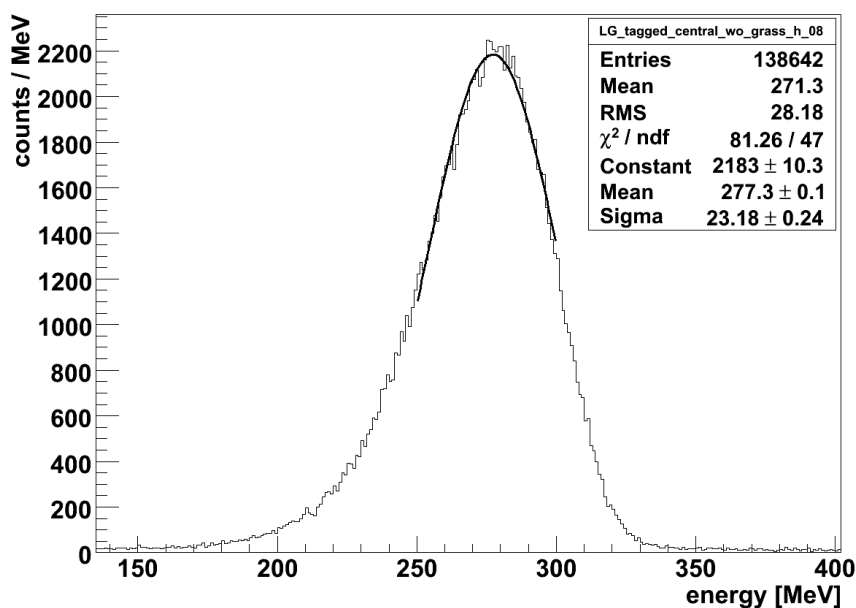


Abbildung 3.11: Energie-Verteilung der Photonen des Taggerkanals 8 in K35

Daraufhin wurden neue Zeitspektren für den zentralen Kristall angelegt. In diese wurde nur der TDC-Kanal solcher Ereignisse eingetragen, bei welchen die entsprechende deponierte Energie des Taggerphotons maximal eine Standardabweichung vom Energiemittelwert entfernt war. So ergaben sich zum Beispiel für die Photonen des Taggerkanals 1 die Energieschwellen $E_{min} = 512,5$ MeV und $E_{max} = 578,7$ MeV. Um Δt aus den Zeitspektren des zentralen Kristalls zu ermitteln, wurden die Signale zunächst mit dem Eichfaktor 0,18 ns pro Kanal kalibriert und nachfolgend mit Gauß-Funktionen gefittet (Abb. 3.12). Die Standardabweichung σ_t dieses Fits entspricht dem Fehler Δt , welcher zusammen mit dessen Unsicherheit ($\Delta\sigma_t$) ebenfalls in Tabelle B.1 aufgeführt ist. Bereits an dieser Stelle der Datenanalyse kann man erkennen, dass die Zeitauflösung, die mit Hilfe des PROTO60-Versuchsaufbaus in Mainz erreicht wurde, energieabhängig ist und sich mit steigender Signalamplitude verbessert. Bevor auf diese Abhängigkeit in Kapitel 3.2.2 noch genauer eingegangen wird, ist der Einfluss des Time-Walk-Effekts des Diskriminators auf die Zeitmessung zu überprüfen.

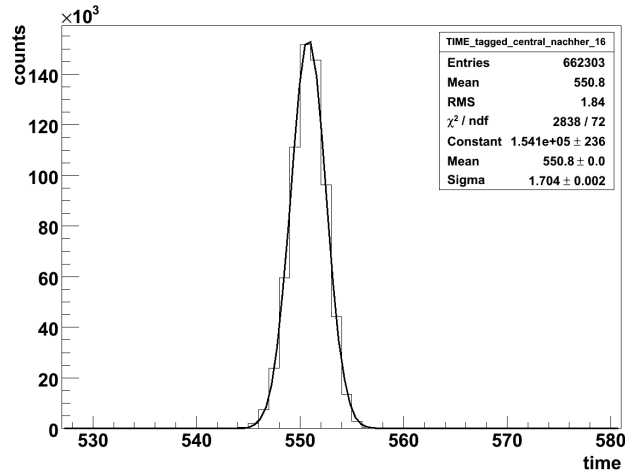


Abbildung 3.12: Fit des Zeitsignals der Photonen des Tagger-Kanals 16

3.2.1 Untersuchung des Time-Walk-Effekts

Die Auflösung des zentralen Kristalls Δt_{K35} wird einerseits durch die intrinsische Auflösung des Kristalls selbst und dessen Ausleseelektronik, andererseits aber auch durch eventuell auftretende Walk-Effekte des Diskriminators bestimmt. Für die Bestimmung des Zeitsignals kann man einen LED³ verwenden. Dieser liefert ein Ausgangssignal, sobald das Eingangssignal eine voreingestellte Schwelle überschreitet. Das kann jedoch zu Messfehlern führen, da zwei Signale mit gleicher Anstiegszeit, aber unterschiedlicher Amplitude diese Schwelle zu verschiedenen Zeiten überschreiten. Diesen Effekt bezeichnet man als Time-Walk-Effekt. Abhilfe schafft die Verwendung eines CFD. Dieser verzögert, dämpft und invertiert das Eingangssignal, bevor es anschließend zum ursprünglichen Signal addiert wird. Der Nulldurchgang des so erzeugten bipolaren Pulses bestimmt das Zeitsignal. Damit macht der CFD den Messprozess relativ amplitudenunabhängig. Weil der Walk-Effekt aber gerade bei kleinen Eingangssignalen (entspricht niedrigen Photonenenergien) immer noch auftreten kann, muss ausgeschlossen werden, dass die Zeitauflösung des zentralen Kristalls dadurch signifikant beeinflusst wurde. Dafür wurden für die 16 verschiedenen Tagger-Energien Diagramme angelegt, in denen die gemessene Zeit eines Ereignisses gegen die deponierte Photonenenergie aufgetragen ist. Im Anschluss daran wurde überprüft, ob ein Time-Walk im jeweils ausgewählten Energieintervall zu erkennen ist. Exemplarisch seien die Spektren der Kanäle 16 (niedrigste Photonenenergie) und 1 (höchste Photonenenergie) aufgeführt (Abb. 3.13 und 3.14). Es ist leicht zu sehen, dass der Walk-Effekt und damit auch der Fehler des Diskriminators in erster Näherung vernachlässigt werden kann.

³LED = LeaDing Edge Diskriminator

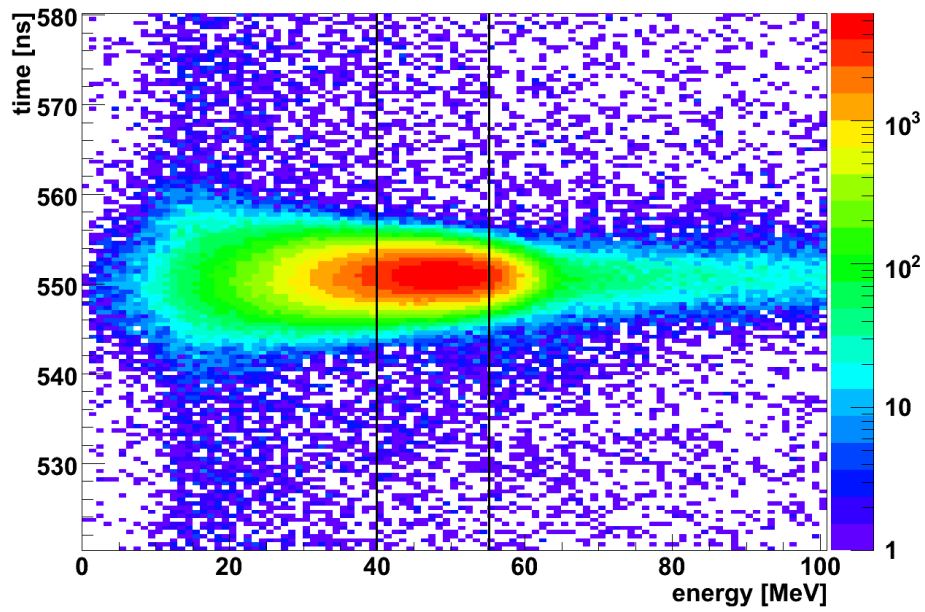


Abbildung 3.13: Tagger-Kanal 16: $E_{min} = 39,9$ MeV, $E_{max} = 55,18$ MeV

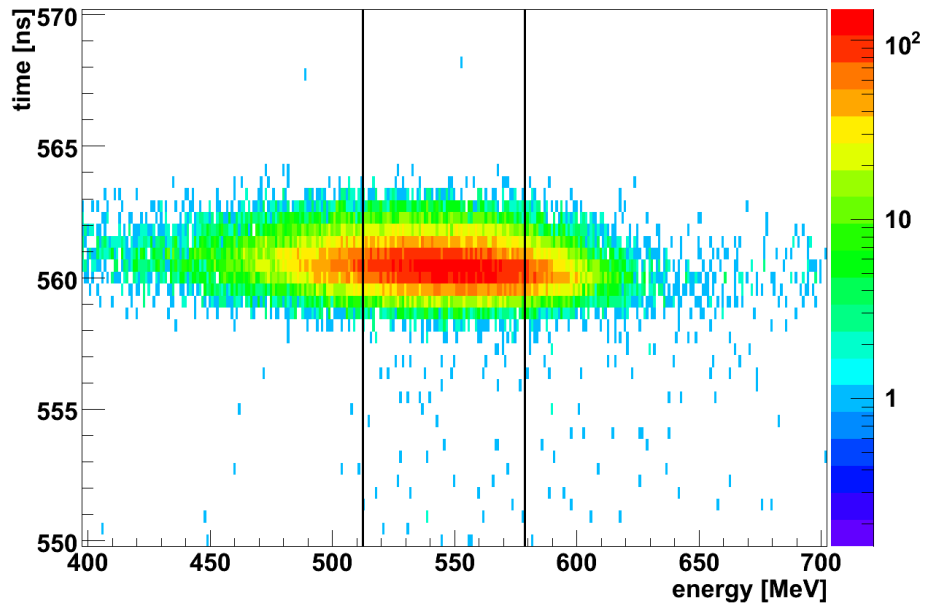


Abbildung 3.14: Tagger-Kanal 1: $E_{min} = 512,5$ MeV, $E_{max} = 578,7$ MeV

3.2.2 Abschätzen der Zeitauflösung

In Abbildung 3.15 sind die ermittelten Zeitauflösungen σ_t gegen die Mittelwerte \bar{E} der bei Ansprechen der jeweiligen Tagger-Kanäle im zentralen Kristall deponierten Energien aufgetragen.

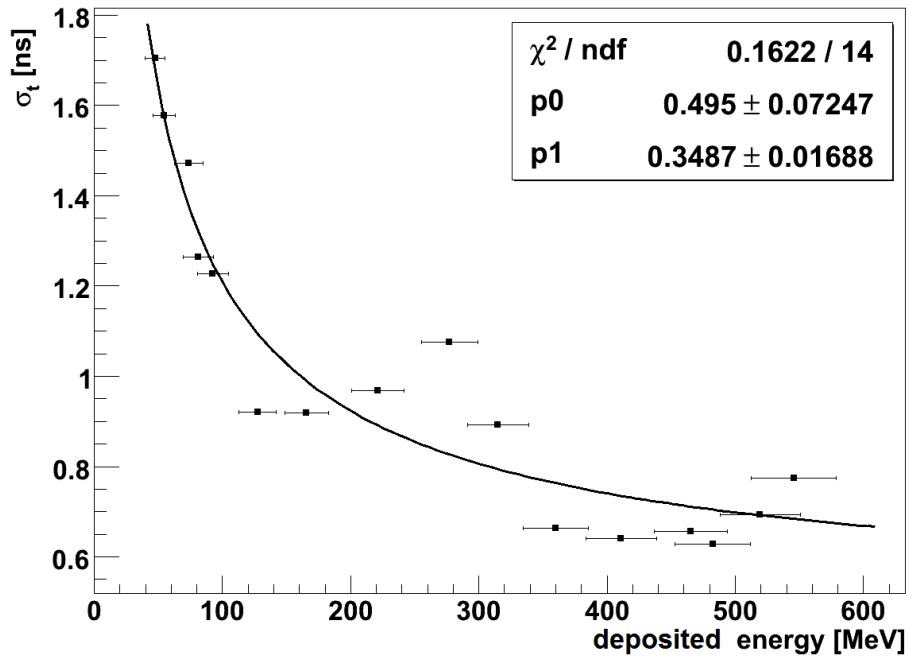


Abbildung 3.15: Zeitauflösung in Abhängigkeit der in Kristall 35 deponierten Energie (mit entsprechenden Fehlerbalken)

Um diese Energieabhängigkeit funktional zu beschreiben, wurden die Datenpunkte unter Nichtberücksichtigung der Fehler mit der Funktion

$$f(x) = \sqrt{a^2 + \left(\frac{b}{\sqrt{x}}\right)^2} \quad (3.7)$$

gefittet. Mit den dadurch erhaltenen Fitparametern ergibt sich die Parametrisierung der Zeitauflösung in Abhängigkeit der Energie zu:

$$\sigma_t(E[\text{GeV}]) = \sqrt{(495\text{ps})^2 + \left(\frac{349\text{ps}}{\sqrt{E[\text{GeV}]}}\right)^2} \quad (3.8)$$

Die Zeitauflösung $\Delta t_{Plastik}$ der Plastiksintillatoren des Mainzer Taggers liegt im Bereich von etwa 170 ps [MCG08]. Da dieser Wert im Vergleich zu dem Gesamtfehler der Zeitmessung als vernachlässigbar klein betrachtet werden kann, stimmt die Zeitauflösung σ_t also im Wesentlichen mit der Auflösung Δt_{K35} des Kristalls 35 überein:

$$\sigma_t = \sqrt{(\Delta t_{K35})^2 + (\Delta t_{Plastik})^2} \approx \Delta t_{K35} \quad (3.9)$$

Durch das Ausschließen eventuell auftretender Time-Walk-Effekte kann die Größe Δt_{K35} schließlich mit dem intrinsischen Fehler des PWO-II-Kristalls und dessen Ausleseelektronik identifiziert werden. Dieser Fehler ergibt sich hauptsächlich aus dem Verhältnis von Signalamplitude zu elektronischem Rauschen. Eine Zeitauflösung des Bleiwolframatkristalls von unter einer Nanosekunde wird (bezogen auf die Messdaten) ab ca. 300 MeV deponierter Energie erreicht. Auf Gleichung 3.8 basierend ergibt sich eine Zeitauflösung σ_t von rund 600 ps bei einer Energiedeposition von 1 GeV. Die Beurteilung dieser Werte hinsichtlich der EMC-Spezifikationen und die Diskussion der Qualität der ausgewerteten Daten erfolgt abschließend in Kapitel 4.

Kapitel 4

Diskussion

Für die zukünftigen Experimente mit Antiprotonen am GSI Helmholtzzentrum sind Energie- und Zeitinformationen elektromagnetischer Proben von großer Bedeutung. Die Rekonstruktion der im EMC deponierten Energien erfordert neben einem leistungsfähigen Szintillatormaterial auch eine zuverlässige Energieeichung. Die Bleiwolframatkristalle sollen zunächst mit Hilfe kosmischer Myonen vorkalibriert werden, bevor im HESR die Feinkalibration mit experimentellen Proben vorgenommen wird.

Aufgrund des kurzen Abstands des Targets vom EMC-Detektor sind auch bei guter Zeitauflösung keine TOF¹-Analysen möglich. Da die Erfassung der Daten der verschiedenen Komponenten des PANDA-Detektors jedoch ohne Hardware-Trigger geschieht, wird jedes von den Komponenten detektierte Ereignis digitalisiert und mit einem entsprechenden Zeitstempel versehen. Eine hohe Zeitauflösung des EMCs ist also vielmehr erforderlich, um die Zuordnung der registrierten Events gewährleisten und mögliche Untergrundereignisse unterdrücken zu können.

4.1 Energieeichung

Einen der Eichpunkte zur Energiekalibration der Kristalle des PROTO60 lieferte das Pedestal. Dafür wurden vom Testpulsler Gates erzeugt, mit denen das elektronische Rauschen mit Hilfe eines Peaksensing-ADCs quantifiziert wurde. Es ist zu beachten, dass die ausgewerteten Pedestal-Positionen deshalb nicht exakt dem Energie-Nullwert entsprechen, da durch die ADCs jeweils der Signalpeak und nicht der Mittelwert des Signalrauschens erfasst wurde. Der dadurch entstandene Fehler kann aber als hinreichend klein betrachtet werden.

In bisherigen Experimenten wurde der PROTO60 durch die horizontale Ausrichtung der Kristalle geeicht. In dieser Position wird in den Kristallen eine Energie von rund 20 MeV durch kosmische Myonen deponiert.

¹TOF = Time of Flight

Durch die Aufnahme der Energiespektren unter vertikaler Ausrichtung des Detektors in Gießen sollte zudem ein zusätzlicher Eichpunkt gewonnen werden. Mit diesem hätte die Energiekalibration zusammen mit dem Eichpunkt der horizontalen Eichung über einen weit größeren Energiebereich durchgeführt werden können. Leider war anhand der aufgenommenen Energiespektren recht schnell zu sehen, dass die beiden Methoden der Kalibration nicht vollständig konsistent zueinander waren. Daher wurde der PROTO60 mit den Spektren beider Kristallorientierungen separat kalibriert und die erhaltenen Eichfaktoren anschließend miteinander verglichen.

Durchqueren kosmische Myonen einen einzelnen PWO-II Kristall in vertikaler Ausrichtung in seiner vollen Länge, so deponieren diese eine Energie von etwa 200 MeV. In den aufgenommenen Energiespektren ist zusätzlich zur Häufigkeitsverteilung der Energie-deposition minimalionisierender Myonen auch noch eine niederenergetische Komponente zu erkennen (Abbildung 3.6). Diese stammt vermutlich von Myonen niedriger Energie, die in den Kristallen vollständig gestoppt werden. Abbildung 4.1 zeigt zwei Spektren früherer Messungen. Für die Erzeugung des linken Spektrums wurden ober- und unterhalb des PROTO60 Plastikszintillatoren angebracht. Diese fungierten als externer Trigger, sodass die Kristalle nur dann ausgelesen wurden, wenn beide Szintillatoren koinzident angesprochen hatten. Da durch diese Bedingung das vollständige Durchqueren der Kristalle vorgegeben war, wurden die bereits erwähnten Ereignisse niederenergetischer Myonen verworfen, die in der rechten Abbildung - ohne Trigger - zu sehen sind. Daher sollten in noch folgenden Eichmessungen, wie beschrieben, Plastikszintillatoren eingesetzt werden.

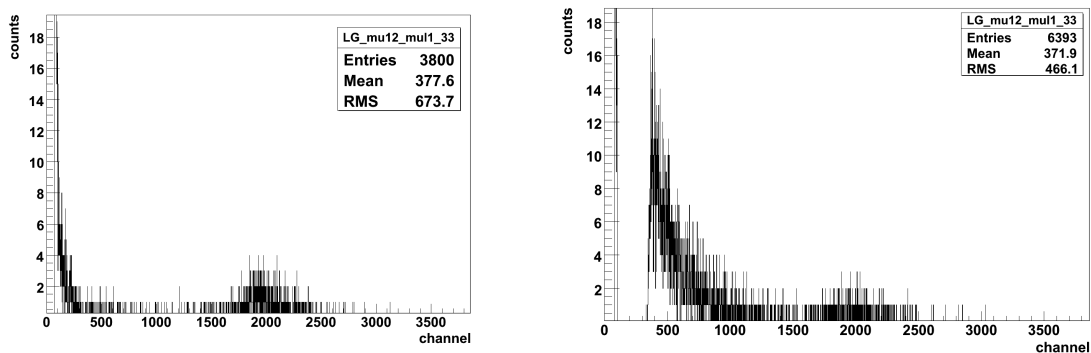


Abbildung 4.1: Energiespektren kosm. Myonen unter vertikaler Kristallausrichtung mit (linke Abbildung) und ohne (rechte Abbildung) externen Trigger

Die Eichfaktoren der Kalibrationen beider Kristallorientierungen unterscheiden sich um ca. 7,4 % (Kapitel 3.1.3). Ein Grund für diese Diskrepanz könnte die Unsicherheit in der Bestimmung der im Kristall zurückgelegten Wegstrecke der kosmischen Myonen sein. Der tabellierte Wert für die Energiedeposition der minimalionisierenden Myonen beträgt $\Delta E/\Delta x = 10,2007 \text{ MeV/cm}$.

Mit diesem wurde die Energiedeposition in den Kristallen über

$$E_{\mu} = (\Delta E / \Delta x) \cdot \Delta l \quad (4.1)$$

berechnet, wobei Δl die jeweils angenommene Weglänge bezeichnet. Setzt man beispielsweise bei der horizontalen Eichung aufgrund der gegeneinander versetzten und gedrehten Kristallebenen eine längere Wegstrecke der kosmischen Myonen in den PWO-II Kristallen voraus, so ergibt sich daraus eine größere Energiedeposition der Cosmics, was wiederum zu einer Annäherung der Eichfaktoren beider Kristallorientierungen führt. Daher sollten für noch folgende Kalibrationen vorab Simulationen durchgeführt werden, um Δl für die jeweilige Kristallorientierung so exakt wie möglich zu bestimmen.

Ein weiterer Grund für die signifikant unterschiedlichen Eichfaktoren könnte der Effekt der nichtlinearen Lichtsammlung sein. Simulationen und erste Messungen haben ergeben, dass die Lichtausbeute der Kristalle bei gleicher deponierter Energie vom Ort der Energiedeposition im Kristall abhängt. Abbildung 4.2 zeigt den Aufbau und das Resultat einer 2009 durchgeführten Simulation [EIS09]. Die Anzahl der von einem photosensitiven Detektor (hier: Photomultiplier) erfassten Szintillationsphotonen einer 1 MeV Gammaquelle wächst mit dem Abstand der Quelle innerhalb des Kristalls zum Photosensor. Dieses auf den ersten Blick verblüffende Ergebnis resultiert aus einem komplizierten Wechselspiel von Selbstabsorption im Szintillatormaterial und Reflexion der Photonen an den Grenzflächen des Bleiwolframatkristalls. Dabei müssen die verschiedenen Kristallgeometrien berücksichtigt werden, denn der Effekt ist umso stärker, je größer die Kristallform von einer rechteckigen Geometrie abweicht (Typ 1).

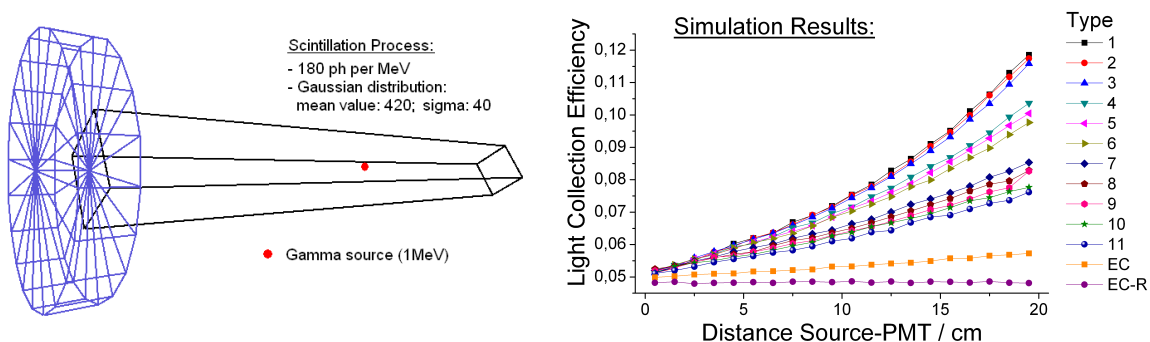


Abbildung 4.2: Simulation und Darstellung der Daten zur Untersuchung des Effekts der nichtlinearen Lichtsammlung [EIS09]

Bei horizontaler Ausrichtung der Kristalle deponiert ein kosmisches Myon seine Energie in einem festen Abstand zum Detektor, während es seine Energie bei vertikaler Kristallorientierung näherungsweise homogen über die gesamte Kristalllänge verliert. In welcher Hinsicht der Effekt der nichtlinearen Lichtsammlung die beiden Energieeichungen beeinflusst, bleibt daher für zukünftige Kalibrationen zu überprüfen.

Ein zusätzlicher Aspekt, der in Betracht gezogen werden muss, ist ein möglicher Unterschied in der Betriebstemperatur des PROTO60 während der Aufnahme der Energiespektren kosmischer Myonen beider Kristallorientierungen. Nimmt man an, dass die Temperaturdifferenz der Kristalle während zwei verschiedener Messungen (hier etwa durch den Neuaufbau des Versuchs in Gießen verursacht) 1 °C beträgt, so hätte das bereits einen großen Effekt auf die aufgenommenen Energiespektren. Die Amplituden der gemessenen Signale der Kristalle würden sich bei gleicher Energiedeposition merklich unterscheiden, da sowohl die Lichtausbeute der PWO-II Kristalle als auch der Gain der verwendeten APDs stark temperaturabhängig ist. Trotz des sorgfältigen Versuchsaufbaus kann der Einfluss eines Temperaturunterschieds auf die ausgewerteten Eichfaktoren nicht ausgeschlossen werden.

4.2 Zeitauflösung

Die Zeitauflösung des zentralen Kristalls wurde unter Vernachlässigung des Zeitfehlers der Plastiksintillatoren abgeschätzt, da diese im Allgemeinen eine hohe Zeitauflösung (< 200 ps) besitzen und keine Time-Walk-Effekte aufweisen. Obwohl der CFD, der für Kristall 35 verwendet wurde, zwar justiert, aber nicht optimiert wurde, ergab die in Kapitel 3.2.1 beschriebene Untersuchung, dass bei der Aufnahme der Zeitspektren des Bleiwolframatkristalls keine merklichen Walk-Effekte auftraten. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die ausgewertete Zeitauflösung alleine durch die intrinsische Auflösung des PWO-II Kristalls und dessen Ausleseelektronik bestimmt wurde. Dieser Fehler, der letztendlich durch das Verhältnis von Signalamplitude zu elektronischem Rauschen ($\approx \text{const.}$) gegeben ist, sinkt mit steigender Anzahl an Szintillationsphotonen, welche proportional zu der im Kristall deponierten Energie ist. Die in dem Mainzer Experiment ermittelte Energieabhängigkeit der Zeitauflösung kann mit der Funktion

$$\sigma_t(E[\text{GeV}]) = \sqrt{(495\text{ps})^2 + \left(\frac{349\text{ps}}{\sqrt{E[\text{GeV}]}}\right)^2} \quad (4.2)$$

beschrieben werden.

Mit dieser Gleichung ergibt sich eine Auflösung von ca. 600 ps bei 1 GeV deponierter Energie. Abgesehen von einer Ausnahme (Tagger-Kanal 8) kann für Energiedepositionen über 100 MeV eine Zeitauflösung im Subnanobereich festgestellt werden. Da sich bereits in einem früheren Experiment in Mainz eine größere Diskrepanz eines einzigen Taggerkanals (bei $E \approx 500$ MeV, [BRE09]) von den restlichen Werten ergab, liegt die Vermutung nahe, dass die Abweichung der Auflösung für die mittlere deponierte Photonenenergie von 277,2 MeV möglicherweise der dazugehörigen Tagger-Elektronik zuzuschreiben ist. Die im TDR² geforderte Zeitauflösung von 3 ns wurde allerdings für alle untersuchten Energien erreicht bzw. sogar deutlich unterschritten [TDR08].

Diese Ergebnisse decken sich mit den bisherigen Messungen. In einem der vorangegangenen Experimente wurde der Photonenstrahl des Mainzer Taggers genau zwischen zwei Kristalle justiert und die produzierten Signale mit Sampling-ADCs ausgelesen. Das Zeitsignal wurde schließlich durch die Differenz der einzelnen Signale t_1 und t_2 der beiden benachbarten Kristalle bestimmt. Unter der Annahme, dass diese PWO-II Kristalle die gleiche Zeitauflösung besitzen, konnte die Zeitauflösung eines einzelnen Kristalls nachfolgend aus

$$\Delta t = \sqrt{(\Delta t_1)^2 + (\Delta t_2)^2} \approx \sqrt{2} \cdot \Delta t_{PWO} \Leftrightarrow \Delta t_{PWO} \approx \Delta t / \sqrt{2} \quad (4.3)$$

berechnet werden. Diese Zeitauflösung ist in Abbildung 4.3 gegen die jeweilige im Kristall deponierte Energie aufgetragen. Die Auflösungen sind mit den in Abbildung 3.15 zu sehenden Zeitauflösungen des Kristalls 35, die im Rahmen dieser Thesis ermittelt wurden, vergleichbar.

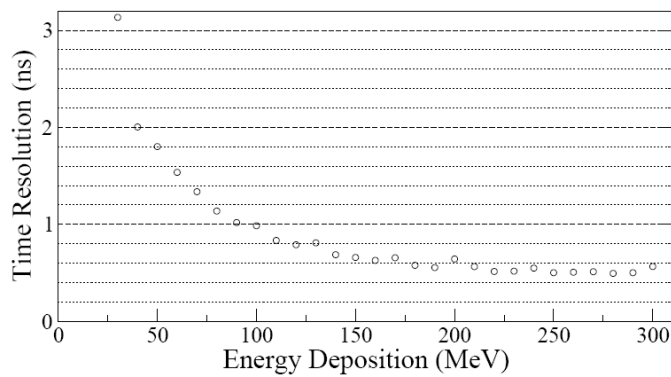


Abbildung 4.3: Zeitauflösung in Abhängigkeit der deponierten Energie [KAV] (frühere Messung)

²TDR = Technical Design Report

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gegenwärtige und geplante Anlagen der GSI in Darmstadt	5
1.2	Zustände in Abhängigkeit des Antiprotonenimpulses	6
1.3	Konzeptionelle Gesamtansicht des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektors	7
1.4	Barrel und Forward End-Cap des EMC	8
2.1	Ausschnitt der Beschleunigeranlage in Mainz	9
2.2	Querschnitt durch die Seitenansicht des PROTO60	10
2.3	Nummerierung der Kristalle aus der Strahlperspektive	11
2.4	Geometrie der Kristalle des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Barrel-EMC	11
2.5	Schematische Darstellung des Tagger-Spektrometers	13
2.6	PROTO60 Versuchsaufbau in Mainz	14
2.7	Schematische Darstellung der Auslese-Elektronik	16
3.1	Wegstrecken der Myonen bei horizontaler Orientierung des PROTO60	19
3.2	Testpuls-Spektrum des Kristalls 9 mit Gauß-Fit	19
3.3	Rohdaten der nachgewiesenen Myonen in Kristall 26 (K26)	20
3.4	Energiespektrum kosm. Myonen mit Koinzidenzbedingung (K26)	20
3.5	Fit der Verteilung mit einer Landau-Funktion (K26)	20
3.6	Fit der Verteilung kosm. Myonen von Kristall 25	21
3.7	Verhältnis F_v/F_h für die einzelnen Kristalle des PROTO60	22
3.8	Energiespektrum des Kristalls 35 mit horizontaler und vertikaler Eichung	23
3.9	Energiespektrum des Kristalls 48 mit horizontaler und vertikaler Eichung	23
3.10	Zeitspektrum des Tagger-Kanals 5	24
3.11	Energie-Verteilung der Photonen des Taggerkanals 8 in K35	25
3.12	Fit des Zeitsignals der Photonen des Tagger-Kanals 16	26
3.13	Tagger-Kanal 16: $E_{min} = 39,9$ MeV, $E_{max} = 55,18$ MeV	27
3.14	Tagger-Kanal 1: $E_{min} = 512,5$ MeV, $E_{max} = 578,7$ MeV	27
3.15	Zeitauflösung in Abhängigkeit der in Kristall 35 deponierten Energie	28
4.1	Energiespektren kosm. Myonen unter vertikaler Kristallausrichtung	32
4.2	Effekt der nichtlinearen Lichtsammlung	33
4.3	Zeitauflösung in Abhängigkeit der deponierten Energie	35

Literaturverzeichnis

- [BRE09] D. Bremer, *Reconstruction of Electromagnetic Showers and Determination of the Position Resolution of a Prototype of the \bar{P} ANDA Electromagnetic Calorimeter*, Dipl. Arbeit, Justus-Liebig-Universität Gießen, 2009
- [CMS10] CMS Collaboration, *Measurement of the muon stopping power in lead-tungstate*, 2010
- [EIS09] T. Eissner, *Quality Control of $PbWO_4$ -Crystals for the \bar{P} ANDA Detector*, Dipl. Arbeit, Justus-Liebig-Universität Gießen, 2009
- [GSI10] Gesellschaft für Schwerionenforschung, *FAIR-Projekt*, Webseite unter <http://www.gsi.de/fair/> (2010)
- [IFK10] Institut für Kernphysik der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Webseite unter <http://www.kph.uni-mainz.de/> (2010)
- [KAV] Myroslav Kavatsyuk (KVI), private Mitteilung
- [KRU95] B. Krusche, *Photoproduction of π_0 and h mesons from nucleons and nuclei in the second resonance region*, Habilitationsschrift Gießen, 1995
- [LEO87] William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, 1987
- [LER09] Claude Leroy und Pier-Giorgio Rancoita, *Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection*, 2009
- [MCG08] J.C. McGeorge et al, *Upgrade of the Glasgow photon tagging spectrometer for Mainz MAMI-C*, 2008
- [MOR09] M. Moritz, *Ansprechverhalten des PROTO 60, Untereinheit des PANDA Detektors, auf hochenergetische Photonen*, Dipl. Arbeit, Justus-Liebig-Universität Gießen, 2009
- [NOV1] R. Novotny et al, *The \bar{P} ANDA Electromagnetic Calorimeter - a high-resolution detector based on PWO-II*, 2009

- [NOV2] R. Novotny, *Vorlesung: Messmethoden der Kern- und Teilchenphysik*, 2009
- [PAN10] \bar{P} ANDA Kollaboration, *\bar{P} ANDA Experiment*, Webseite unter <http://www-panda.gsi.de/> (2010)
- [PDG10] PARTICLE DATA GROUP collaboration, *Atomic and Nuclear Properties of Materials*, Webseite unter <http://pdg.lbl.gov/2009/AtomicNuclearProperties/> (2010)
- [PPR09] \bar{P} ANDA-Collaboration, *Physics Performance Report for \bar{P} ANDA*, 2009
- [REI99] Andreas Reiter, *Entwicklung und Test eines ortsauflösenden Detektors für die Photonenmarkierungsanlage*, Dipl. Arbeit, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 1999
- [TDR08] \bar{P} ANDA-Collaboration, *Technical Design Report for \bar{P} ANDA EMC*, 2008
- [TPR05] \bar{P} ANDA-Collaboration, *Technical Progress Report for \bar{P} ANDA*, 2005

Anhang A

Daten der Energiekalibration

Kristall Nr.:	Horizontale Kalibration			Vertikale Kalibration		
	x_{Ped}	x_{μ}	F_h [MeV/Kanal]	x_{Ped}	x_{μ}	F_v [MeV/Kanal]
1	104,9	344,6	0,1023	103,3	2025	0,1062
2	85,75	311,1	0,1088	85,49	1839	0,1163
3	102,5	346,6	0,1004	101,4	2034	0,1056
4	100,2	346,2	0,0997	98,69	2052	0,1044
5	76,72	312	0,1042	75,29	1952	0,1087
6	91,8	320,3	0,1073	91,24	1887	0,1136
7	105,5	334,2	0,1072	104,4	1837	0,1178
8	92,31	327,4	0,1043	91,1	1997	0,1070
9	98,1	337,1	0,1026	97,03	1946	0,1103
10	95,96	339,4	0,1007	95,22	2057	0,1040
11	98,58	319,9	0,1108	97,48	1861	0,1157
12	98,62	336,7	0,1030	97,3	1990	0,1078
13	84,42	305,8	0,1107	82,88	-	-
14	98,99	330	0,1061	97,91	-	-
15	104,8	336,1	0,1060	103,6	1872	0,1154
16	75,65	314,4	0,1027	74,36	1864	0,1140
17	87,66	307,7	0,1114	85,89	1794	0,1194
18	84,42	325,6	0,1016	82,86	1998	0,1065
19	83,7	316,5	0,1053	82,2	1882	0,1134
20	87,04	309,6	0,1101	85,38	1860	0,1150
21	82,62	339,8	0,0953	81,32	2032	0,1046
22	77,46	309,4	0,1057	75,93	1836	0,1159
23	75,25	314,8	0,1023	73,72	1914	0,1109
24	91,32	328	0,1036	89,61	1900	0,1127
25	93,92	309,5	0,1137	92,68	1772	0,1215

Anhang A Daten der Energiekalibration

Kristall Nr.:	Horizontale Kalibration			Vertikale Kalibration		
	x_{Ped}	x_{μ}	F_h [MeV/Kanal]	x_{Ped}	x_{μ}	F_v [MeV/Kanal]
26	90,72	316,8	0,1084	89,01	1871	0,1145
27	105,7	337,7	0,1057	104,2	1966	0,1096
28	92,18	336,9	0,1002	90,28	1984	0,1077
29	81,35	315,8	0,1046	79,56	1891	0,1126
30	89,12	301,2	0,1156	87,16	1842	0,1163
31	90,17	321,4	0,1060	88,16	1891	0,1132
32	-	-	-	93,91	1905	0,1126
33	68,22	298,7	0,1064	66,25	1870	0,1131
34	66,6	290,6	0,1094	64,62	1830	0,1156
35	80,97	185,7	0,2341	80,71	880,2	0,2552
36	79,73	322,6	0,1009	77,63	1959	0,1084
37	82,37	317,6	0,1042	80	1853	0,1151
38	100,8	329,6	0,1071	98,68	1832	0,1177
39	73,09	315,9	0,1010	71,12	1877	0,1130
40	87,38	301,4	0,1145	84,38	1647	0,1306
41	78,65	312,4	0,1049	76,48	1862	0,1143
42	112,5	322,6	0,1167	109,4	1735	0,1255
43	57,75	292	0,1046	54,81	1843	0,1141
44	91,72	345,6	0,0966	88,34	2048	0,1041
45	70,71	291,1	0,1112	67,54	1767	0,1200
46	107,8	337,2	0,1069	104,3	1861	0,1161
47	78,04	299,7	0,1106	75,14	1811	0,1175
48	94,07	322,4	0,1074	91,39	1825	0,1177
49	81,88	317,6	0,1040	80	-	-
50	76,2	313,1	0,1035	74,64	-	-
51	72,15	287,3	0,1139	70,64	1733	0,1227
52	78,67	305,1	0,1083	77,23	1831	0,1163
53	98,27	326,9	0,1072	96,58	1776	0,1215
54	77,21	279,4	0,1212	76,54	1737	0,1229
55	88,3	302,1	0,1147	87,84	-	-
56	113,7	322,9	0,1172	113,4	-	-
57	117,1	345,3	0,1074	116,6	1832	0,1189
58	109,1	313,9	0,1197	108,3	1663	0,1312
59	96,62	270,9	0,1407	95,87	1472	0,1483
60	109,1	334,8	0,1086	108	1775	0,1224

Tabelle A.1: Fit-Parameter beider Kristallorientierungen (rot markiert: Kristalle der 3x3 Untermatrix)

Kristall Nr.	F_h	F_v	F_v/F_h	Kristall Nr.	F_h	F_v	F_v/F_h
1	0,1023	0,1062	1,0381	31	0,1060	0,1132	1,0674
2	0,1088	0,1163	1,0695	32	-	0,1126	-
3	0,1004	0,1056	1,0512	33	0,1064	0,1131	1,0634
4	0,0997	0,1044	1,0481	34	0,1094	0,1156	1,0560
5	0,1042	0,1087	1,0434	35	0,2341	0,2552	1,0902
6	0,1073	0,1136	1,0590	36	0,1009	0,1084	1,0743
7	0,1072	0,1178	1,0985	37	0,1042	0,1151	1,1042
8	0,1043	0,1070	1,0265	38	0,1071	0,1177	1,0986
9	0,1026	0,1103	1,0758	39	0,1010	0,1130	1,1190
10	0,1007	0,1040	1,0327	40	0,1145	0,1306	1,1398
11	0,1108	0,1157	1,0444	41	0,1049	0,1143	1,0895
12	0,1030	0,1078	1,0469	42	0,1167	0,1255	1,0756
13	0,1107	-	-	43	0,1046	0,1141	1,0902
14	0,1061	-	-	44	0,0966	0,1041	1,0782
15	0,1060	0,1154	1,0885	45	0,1112	0,1200	1,0793
16	0,1027	0,1140	1,1103	46	0,1069	0,1161	1,0868
17	0,1114	0,1194	1,0721	47	0,1106	0,1175	1,0627
18	0,1016	0,1065	1,0481	48	0,1074	0,1177	1,0961
19	0,1053	0,1134	1,0765	49	0,1040	-	-
20	0,1101	0,1150	1,0437	50	0,1035	-	-
21	0,0953	0,1046	1,0972	51	0,1139	0,1227	1,0771
22	0,1057	0,1159	1,0967	52	0,1083	0,1163	1,0745
23	0,1023	0,1109	1,0833	53	0,1072	0,1215	1,1330
24	0,1036	0,1127	1,0880	54	0,1212	0,1229	1,0134
25	0,1137	0,1215	1,0684	55	0,1147	-	-
26	0,1084	0,1145	1,0559	56	0,1172	-	-
27	0,1057	0,1096	1,0371	57	0,1074	0,1189	1,1071
28	0,1002	0,1077	1,0755	58	0,1197	0,1312	1,0963
29	0,1046	0,1126	1,0771	59	0,1407	0,1483	1,0540
30	0,1156	0,1163	1,0058	60	0,1086	0,1224	1,1268

Tabelle A.2: Verhältnis der Eichfaktoren beider Kristallorientierungen

Anhang B

Daten zur Bestimmung der Zeitauflösung

\bar{E} [MeV]	σ_E [MeV]	σ_t [ns]	$\Delta\sigma_t$ [ns]
47,54	7,64	1,704	0,002
54,42	8,73	1,577	0,002
73,68	11,42	1,472	0,002
80,98	11,66	1,265	0,002
92,41	12,19	1,227	0,002
127,4	14,56	0,9207	0,0015
165,6	17,11	0,9185	0,0018
221,2	20,29	0,9677	0,0022
277,2	22,15	1,076	0,002
314,9	23,96	0,8921	0,0027
359,9	25,26	0,664	0,002
411	27,58	0,6415	0,0023
465,4	28,38	0,6573	0,0028
482,4	29,47	0,6286	0,0021
519,5	31,3	0,6936	0,003
545,6	33,1	0,7742	0,0041

Tabelle B.1: Fit-Parameter der Energie- und Zeitspektren des zentralen Kristalls

Erklärung der Urheberschaft

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

Gießen, den 2. August 2010