

Systematische Studien zur π^0 Kalibrierung des Crystal-Ball Detektor

von

Martin Sobotzik

Bachelorarbeit in Physik
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
am 10. Mai 2017

1. Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Gradl
2. Gutachter: Prof. Dr. Achim Denig

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Mainz, den [Datum] [Unterschrift]

Martin Sobotzik
A2-Kollaboration
Institut für Kernphysik
Johannes-Joachim-Becher-Weg 45
Johannes Gutenberg-Universität D-55128 Mainz
msobotzi@students.uni-mainz.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Gliederung	2
2. Experimenteller Aufbau am MAMI	3
2.1. Der MAMI-Beschleuniger	3
2.2. Die Photonenmarkierungsanlage	6
2.3. Das Detektorsystem	7
2.3.1. Der Crystal-Ball-Detektor	9
2.3.2. TAPS, PID & MWPC	9
2.4. Szintillatoren	10
2.5. Clustering Algorithmus	11
3. Vorbereitung	13
3.1. Umstellung auf die Crystal-Ball-Fitfunktion	13
3.2. Reduzierung des Untergrunds	14
3.3. Umstellung auf einen neun Ereignisgenerator	15
4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball	20
4.1. Strahlzeit	20
4.1.1. Energie Abhängigkeit	20
4.1.2. Vernachlässigung der Detektoren am Rand	22
4.2. Simulation	25
4.2.1. Mindestwinkel zwischen detektierten Photonen	27
4.2.2. Isotroper Zerfall von π^0 im Ursprung	28
4.2.3. z-Vertex Abhängigkeit	30
4.2.4. Unterschied zwischen generierten und gemessenen Winkeln	31
4.2.5. Unterschied zwischen generierten und berechneten Öffnungswinkel für verschiedene Z-Vertices	34
5. Weitere Beobachtungen	35
5.1. Dead- und Hot-Crystals	35
5.1.1. Verhalten von bereits bekannten Dead- und Hot-Crystals	35
5.1.2. Vermutung für weitere Dead-Crystals	38
5.2. ϕ -Verteilung im Crystal-Ball	40
6. Zusammenfassung und Ausblick	41

Inhaltsverzeichnis

A. Anhang	42
A.1. Herleitung der Formel zur Berechnung der invarianten Masse	42
A.2. Abbildungen	43

1. Einleitung

1.1. Motivation

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball Detektors der A2-Kollaboration am Institut für Kernphysik an der Johannes-Gutenberg-Universität. Die A2-Kollaboration untersucht unter anderem die innere Struktur von Nukleonen mit Hilfe eines, durch Bremsstrahlung erzeugten, reellen Photonenstrahls.

Wird ein hochenergetisches Photon durch ein Proton absorbiert, werden stark wechselwirkende Teilchen erzeugt. Diese Teilchen zerfallen überwiegend in Photonen, welche schließlich mit dem Crystal-Ball Detektor nachgewiesen werden können.

Der Crystal-Ball besteht aus 672 Natriumiodid Kristallen, die als Detektoren dienen und damit ca. 94% des Raumwinkels abdecken. Er besitzt zwei Bereiche ohne Detektor die als Strahlenein- und -ausgang fungierten.

Um die gemessene Energie Detektoren nun zu kalibrieren, betrachtet man folgenden Prozess:



Bei diesem Prozess absorbiert ein Proton p ein hochenergetischen Photon γ . Dabei wird ein π^0 -Meson erzeugt.



Das π^0 -Meson zerfällt direkt zu 98,8% in zwei Photonen und zu ca. 1,2% in $e^+e^-\gamma$. Andere Modi können vernachlässigt werden, da sie nur Verzweigungsverhältnisse von unter 10^{-5} aufweisen. Im Crystal-Ball werden sowohl die Energie der Photonen, als auch ihr Polar- und Azimutwinkel bestimmt, woraus sich die invariante Masse des π^0 berechnen lässt. (Siehe dazu: Abschnitt A.1) Laut Literatur beträgt diese Masse ca. 135 MeV¹ [PDG16], folglich werden die Detektoren so eingestellt, dass sich der errechnete π^0 -Peak bei dieser Masse befindet.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt bei der Untersuchung der Energieabhängigkeit der Kalibrierung des Crystal-Ball-Detektors. Es wird untersucht, wie sich die Kalibrierung des Detektors für verschiedene Photonenenergien verhält und es wird nach der Ursache für diese Abweichungen gesucht.

¹Es werden in der ganzen Arbeit natürliche Einheiten verwendet

1. Einleitung

1.2. Gliederung

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

Der Mainzer Mikrotron (MAMI) ist ein mehrstufiger Rennbahn-Teilchenbeschleuniger (RTM¹) für Elektronenstrahlen und steht verschiedenen Arbeitsgruppen für Experimente zur Verfügung. Die Anlage befindet sich auf dem Gelände des Instituts für Kernphysik (KPh) der Johannes Gutenberg-Universität.

Die A2-Kollaboration untersucht vor allem die Struktur von Nukleonen mit Hilfe von reellen Photonen, welche durch Bremsstrahlung des MAMI-Elektronenstrahls erzeugt werden. Die Photonenergie wird durch eine Photonemarkierungsanlage (Tagger²) bestimmt. Nach der Reaktion mit dem Target werden die Teilchen durch ein System von verschiedenen Teilchendetektoren nachgewiesen.

2.1. Der MAMI-Beschleuniger

1979 wurde das MAMI erstmals in Betrieb genommen und bestand damals nur aus einem einzelnen RTM, womit eine maximale Elektronenergie von 14 MeV erreicht werden konnte. Im Laufe der Jahre wurde das MAMI um zwei weitere RTMs und einem HDSM³ erweitert, wodurch heutzutage eine Elektronenergie von ca. 1,6 GeV erreicht werden kann [KPh11G].

Um unpolarisierte Elektronen zu erzeugen, wird eine Glühkathode auf 1000°C erhitzt. Dadurch können Elektronen den Heizdraht aufgrund ihrer thermischen Bewegung verlassen. Diese Elektronen werden dann durch ein elektrisches Feld, welches zwischen einer heißen Kathode und einer Anode, erzeugt wird, zur Anode beschleunigt und treten dann durch ein Loch in der Anode aus und werden weiter durch einen Linearbeschleuniger mit einer Frequenz von 2,45 GHz auf ca. 3,5 MeV beschleunigt. Diese Frequenz ist für das MAMI typisch und macht es zu einem Dauerstrich-Elektronen-Beschleuniger. Das heißt die Frequenz, mit der die Elektronen-Pakete auftreten, ist größer, als die Frequenz, mit der die Detektoren einzelne Events auflösen können und somit wirkt der Strahl für die Detektoren kontinuierlich. Am MAMI ist es auch möglich einen spinpolarisierten Elektronenstrahl zu erzeugen, dazu wird ein GaAs Kristall mit polarisiertem Laserlicht bestrahlt.

Die Strahlzeit, welche in dieser Arbeit untersucht wird, besitzt einen unpolarisierten Strahl.

Da die Elektronen mit einem Linearbeschleuniger nur einige MeV pro Meter beschleunigt werden können, und man keine kilometerlangen Strecke bauen kann, entschied

¹Race-Track-Microtron

²to tag = markieren

³Harmonic Double Sided Microtron

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

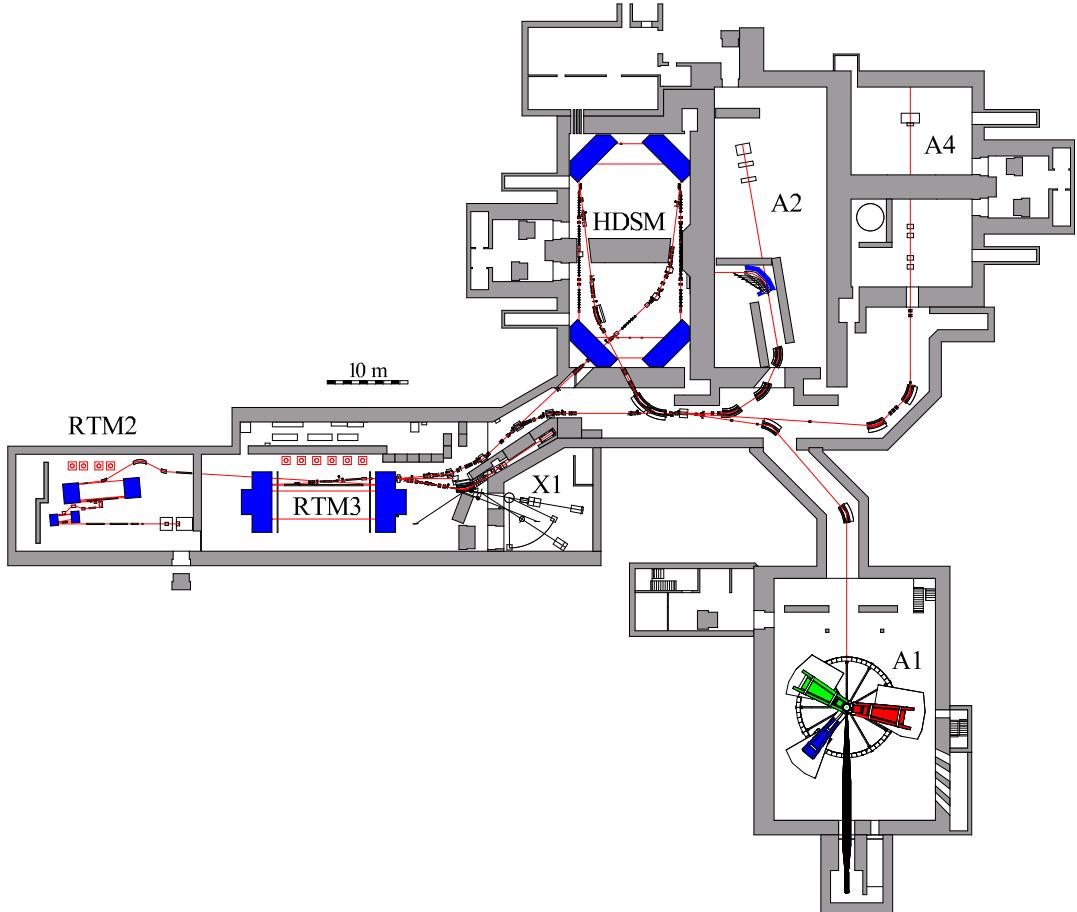


Abbildung 2.1.: Grundriss der Beschleunigeranlage MAMI. Zu sehen sind die drei RTMs, der HDSM der Tagger und die verschiedenen Experimentierhallen: A1 (Elektronenstreuung), A2 (Strukturanalyse von Nukleonen), A4 (Paritätsverletzung) und X1 (Röntgenstrahlung) [KPh07].

man sich dafür, die Elektronen mehrmals durch den gleichen Beschleunigerabschnitt zu beschleunigen. Dazu werden sie nachdem sie beschleunigt wurden, durch zwei 180° Dipole so umgeleitet, dass sie wieder am Anfang des Beschleunigerabschnitts sind und diese Bahn abermals durchlaufen können. Nun besitzen die Elektronen allerdings einen größeren Impuls und werden in einer Bahn mit größerem Radius durch die Dipole geleitet bis die gewünschte Energie erreicht wird und der Strahl in den nächsten Abschnitt umgeleitet wird. Die Struktur eines RTM erinnert an eine antike Pferderennbahn, daher hat es auch seinen Namen.

Eine phasengerichtete Rückkopplung ist allerdings nur möglich, wenn die statische und die dynamische Kohärenzbedingung erfüllt sind. Um die statische Kohärenzbedingung zu erfüllen, muss die Länge der ersten vollständigen Bahn ein ganzzahliges Vielaches der Wellenlänge der beschleunigten Hochfrequenz sein. Für die dynami-

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

sche Kohärenzbedingung muss die Längendifferenz von zwei aufeinander folgenden Umläufen ebenfalls ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein [Un08]. Diese Bedingungen geben ebenfalls die Grenzen für den maximal möglichen Energiegewinn jeder Stufe an.

Wie bereits erwähnt besitzt MAMI drei dieser RTMs. Die erste Stufe MAMI A besteht aus zwei RTMs mit 18 bzw. 51 Umläufen. Die zweite Stufe MAMI B besteht aus dem, größten RTM der Welt mit 90 Umläufen und Dipolen mit einer Breite von jeweils 5 m, wodurch sie 450 t schwer waren. Damit sind auch die technischen Grenzen erreicht [KPh11F].

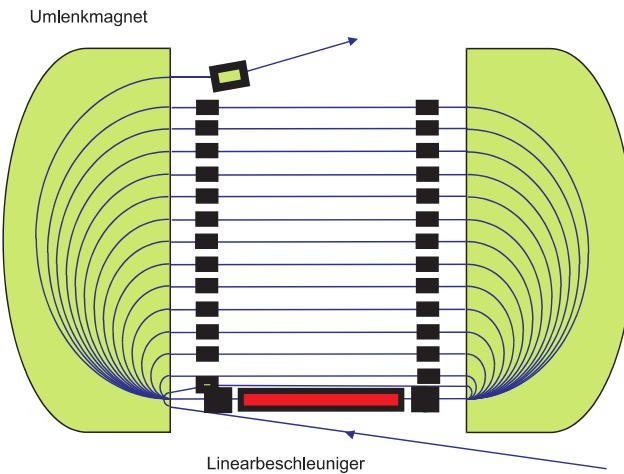


Abbildung 2.2.: Prinzip eines RTM: Der Elektronenstrahl wird immer wieder durch den Linearbeschleuniger geschickt, bis die gewünschte Energie erreicht wird und der Strahl mittels eines sogenannten Kicker-Magnet zum nächstes Abschnitt weiter geleitet wird [KPh07].

Um dennoch höhere Energien zu erreichen, ist ein anderes Konzept erforderlich. MAMI C ist folglich kein RTM mehr, sondern ein HDSM. Das heißt, es besteht aus vier 90° Dipolen, welche jeweils 250 t schwer sind und einem zusätzlichen Linearbeschleuniger. Das bedeutet, dass die Elektronen im HDSM zweimal pro Umlauf beschleunigt werden.

Zwar wird der Rest von MAMI mit einer Hochfrequenz von 2,45 GHz betrieben, allerdings muss der erste Beschleuniger von MAMI-C aufgrund der Hallenlänge mit einer Hochfrequenz von 4,90 GHz laufen, während der zweite für eine bessere longitudinale Strahlstabilität mit 2,45 GHz läuft [Ca10].

Am Ende der Beschleunigung besitzt der Elektronenstrahl eine Energie von ca. 1,6 GeV. Diese kann in Schritten von etwa 15 MeV eingestellt werden. Sein Durchmesser liegt im Mikrometerbereich, was sehr gute Voraussetzungen für Präzisionsexperimente sind. [KPh07].

Das MAMI ist mit über 7000 Stunden im Jahr ca. 81% des Jahres in Betrieb. Fast 6000 Stunden der Betriebszeit werden für Experimente genutzt. Wegen technischer

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

	RTM1	RTM2	RTM3	HDSM
Eingangsenergie	3,455 MeV	14,35 MeV	179,5 MeV	854,6 MeV
Ausgangsenergie	14,35 MeV	179,5 MeV	854,6 MeV	1,6 GeV
Anzahl Umläufe	18	51	90	43
Energiegewinn pro Umlauf	0,559 MeV	3,24 MeV	7,5 MeV	13,93-16,63 MeV

Tabelle 2.1.: Technische Daten der MAMI-Beschleunigerstufen [Un08].

Ausfälle ist MAMI ca. 200 Stunden pro Jahr außer Betrieb. Die restliche Zeit wird zur Vorbereitung und Weiterentwicklung der Beschleunigeranlage genutzt.[KPh11B]

2.2. Die Photonenmarkierungsanlage

In der A2-Experimentierhalle wird schließlich der reelle Photonenstrahl mittels Bremsstrahlung erzeugt. Dazu trifft der MAMI-Elektronenstrahl auf einen Radiator, typischerweise eine dünne Metallfolie oder ein Diamant mit einer Dicke von 10 bis 100 μm . Die Elektronen werden im Coulombfeld eines Kerns des Radiators beschleunigt und können dann, aufgrund der Impulserhaltung ein Photon in Vorwärtsrichtung ausstrahlen.

$$e^- + N \rightarrow N + e^- + \gamma \quad (2.1)$$

Der Rückstoß des Kerns kann aufgrund seiner großen Masse vernachlässigt werden und die Energie der Photonen kann anschließend mit folgender Formel berechnet werden:

$$E_\gamma = E_e - E'_e \quad (2.2)$$

Dabei ist E_e die Energie des Elektronenstrahls und E'_e die Energie der gestreuten Elektronen, welche durch den Glasgow-Mainz-Tagger (siehe Abbildung 2.3) bestimmt wird. Dieser ist ein impulsselektierendes, magnetisches Spektrometer, in dem ein homogenes magnetisches Feld angelegt ist, welches die Elektronen auf Fokalebene lenkt, hinter der sich die Tagger-Elektronenleiter befindet. Dadurch wird zusätzlich der Elektronenstrahl von dem Photonenstrahl getrennt. Dieses Magnetfeld ist außerdem so eingestellt, dass Elektronen, welche keine Energie durch Bremsstrahlung verloren haben, direkt in den Strahlenfang⁴ abgelenkt werden. Die restlichen Elektronen werden dann, je nach Impuls, auf einen anderen Abschnitt der Tagger-Leiter fokussiert. Diese Tagger-Elektronenleiter besteht aus 353 Szintillatoren, welche sich jeweils zur Hälfte überlappen. Dadurch ergeben sich 352 Kanäle mit einer Energieauflösung von $\Delta E \approx 2 \text{ MeV}$ bzw. 4 MeV bei einer Strahlenenergie von $E_e = 800 \text{ MeV}$ bzw. $1,6 \text{ GeV}$. Für die Daten, welche in dieser Arbeit analysiert werden, wird der EPT⁵ benutzt. Das Funktionsprinzip des EPT ist ähnlich zu dem des Glasgow-Mainz-Taggers, allerdings

⁴engl. Beam-Dump

⁵End-Point-Tagger

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

besitzt der EPT nur 47 Kanäle, welche sich nicht überlappen und sind im oberen Photonenenergieende angebracht. Die Strahlführung der e^- wird dafür leicht geändert. Folglich lässt sich der Impuls, durch Kenntnis des Auftrefforts des Elektron auf der Tagger-Leiter bzw. im EPT und der Stärke des Magnetfeldes, bestimmen und dadurch auch die Energie der Elektronen.

Da die Energie des Elektronenstrahls und die der gestreuten Elektronen bekannt ist, kann die Energie der Photonen mit Gleichung 2.2 errechnet werden.

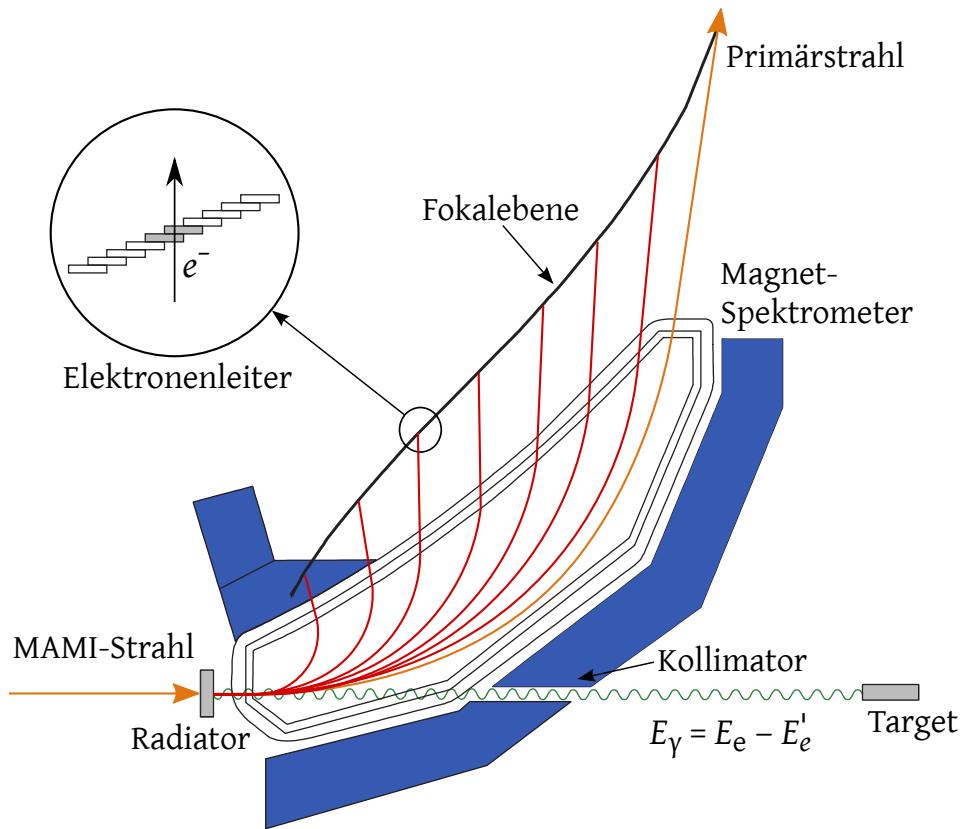


Abbildung 2.3.: Der Glasgow-Mainz-Tagger: Am Radiator entstehen durch Bremsstrahlung Photonen, welche den Kollimator passieren und auf das Target treffen. Die Elektronen werden durch den Dipol auf den Elektronenleiter abgelenkt, wodurch sich ihre Energie bestimmen lässt.[Un08]

2.3. Das Detektorsystem

Nach seiner Erzeugung trifft der Photonenstrahl auf ein ca. 10 cm langes Flüssig-Wasserstoff-Target, welches sich im Zentrum des Crystal-Balls (CB) befindet. Die

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

erzeugten und gestreuten Teilchen können dann durch ein System von Detektoren, bestehend aus dem Crystal-Ball Detektor, einem Teilchenidentifikationsdetektor (PID⁶), zwei Vieldrahtproportionalkammern (MWPC⁷) und einem Photonenspektrometer (TAPS⁸) nachgewiesen werden. Der PID und die MWPC sind im Inneren des CB angebracht. Der TAPS wurde am Ausgang des CB platziert, um einen fast vollständig abgedeckten Raumwinkel zu erreichen.

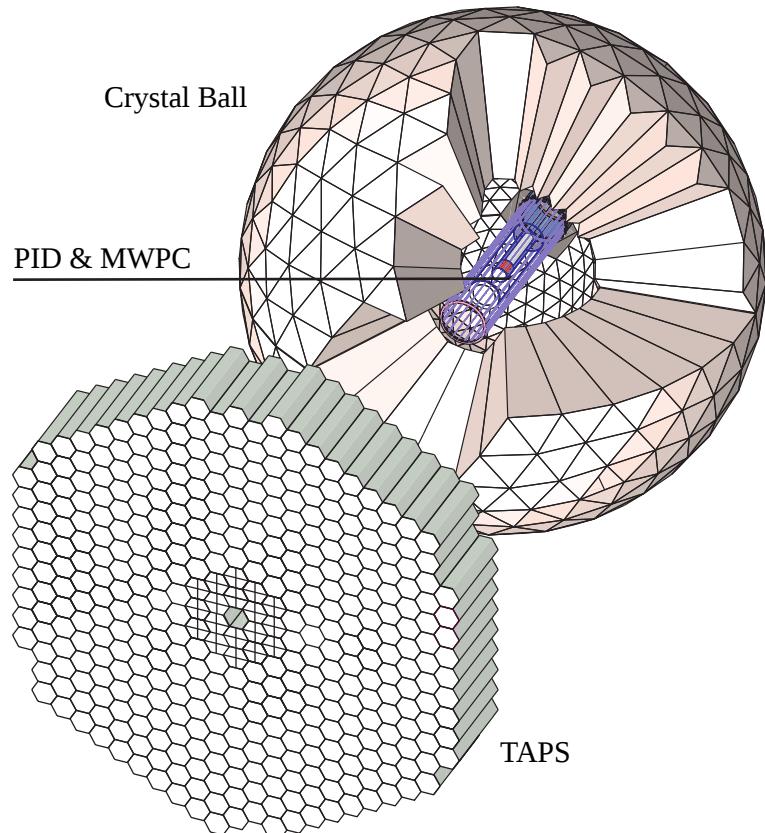


Abbildung 2.4.: Anordnung des Detektorsystems: Im Zentrum des sphärischen Kalorimeters (CB) befinden sich der Detektor zur Teilchenidentifikation (PID) und zwei zur Bestimmung der Teilchen-Trajektorie (MWPC). Die TAPS-Wand befindet sich am Ausgang des CB und sorgt dafür, dass der CB einen Raumwinkel von fast 4π abdeckt [We13].

⁶Particle Identification Detector

⁷Multi-Wire Proportional Chamber

⁸Two Arm Photon Spectrometer

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

2.3.1. Der Crystal-Ball-Detektor

Ursprünglich wurde der Crystal-Ball Detektor Anfang der 70er Jahre am SLAC⁹ entwickelt und zur Untersuchung des J/Ψ -Mesons am SPEAR¹⁰ eingesetzt. Später wurde mit seiner Hilfe das Bottom-Quark am DESY¹¹ und die Baryonenresonanzen am BNL¹² untersucht. Seit November 2002 steht der Crystal-Ball Detektor der A2-Kollaboration am MAMI für Experimente mit reellen Photonen zur Verfügung.

Der Crystal-Ball ist ein Kalorimeter, bestehend aus 672 Natriumiodid (NaI) Szintillatoren, welche so angeordnet sind, dass ca. 94% des Raumwinkels abgedeckt werden. Die Geometrie basiert auf der Form eines Ikosaeders, ein Würfel bestehend aus 20 gleichgroßen gleichseitigen Dreiecken. Jedes dieser Dreiecke ist weiter aufgeteilt in vier kleinere gleichseitige Dreiecke, welche wiederum jeweils in neun gleichseitige Dreiecke unterteilt sind. Somit ergeben sich 720 gleichseitige Flächen. Aufgrund der hohen Anzahl der Flächen erinnert der Crystal-Ball an eine Hohlkugel mit einem Außenradius von ca. 66 cm und einen Innenradius von ca. 25 cm.

Da der Crystal-Ball Detektor ursprünglich in e^+e^- Streuexperimenten verwendet wurde, mussten sowohl, für den Strahleneingang, als auch -ausgang 24 dieser Flächen entfernt werden, wodurch insgesamt 672 Detektoren angebracht werden konnten. Diese Detektoren bestehen aus NaI-Szintillatorkristallen und sind ca. 40 cm ($\sim 15,7$ Strahlungslängen) lang und haben die Form eines Pyramidenstumpfes mit dreieckiger Grundfläche und einer Seitenlänge von etwa 5 cm am schmalen und ca. 13 cm am dicken Ende. Jeder dieser Kristalle ist optisch durch reflektierendes Papier und aluminisierten Mylar durch seine umliegenden Nachbarn isoliert. Ein einzelner Kristall deckt etwa 0,14 % des Raumwinkels ab und wird durch einen eigenen Photoelektronenvervielfacher (PMT¹³) ausgelesen.

2.3.2. TAPS, PID & MWPC

Der PID besitzt eine zylindrische Form mit einem Durchmesser von 116,5 mm und besteht aus 24 einzelnen Szintillatoren, welche jeweils 500 mm lang, 15,3 mm breit und 4 mm dick sind. Da die Szintillatoren nur eine geringe Dicke aufweisen, verlieren Photonen beim durchfliegen weniger als 1% ihrer Energie. Geladene Teilchen auf der anderen Seite erfahren einen Energieverlust ΔE . Ihre restliche Energie wird dann an den Crystal-Ball abgegeben. Folglich kann man durch den PID zwischen geladenen und ungeladenen Teilchen unterscheiden.

Außerhalb des PIDs sind die MWPCs angebracht. Dabei handelt es sich um zwei, aus Anodendrähten aufgebauten, Proportionalzähler in Form von Hohlzylindern. Die Anodendrähte sind parallel zur Strahlenachse ausgerichtet und befinden sich zwischen zwei Lagen von spiralförmigen Kathodenstreifen.

⁹Stanford Linear Accelerator Center

¹⁰Stanford Positron Electron Asymmetric Ring

¹¹Deutsches Elektronen-Synchrotron

¹²Brookhaven National Laboratory

¹³PhotoMultiplier-Tube

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

Da der Crystal-Ball zwei 'Löcher' für den Strahlenein- und Ausgang besitzt, wurde für die Fixed-Target Experimente die TAPS-Wand entwickelt. Diese deckt einen Polarwinkel zur Strahlenachse von $1,2^\circ$ bis 20° ab. Sie wurde etwa 1,5 m vom Mittelpunkt des CB entfernt positioniert und besteht aus 72 PbWO_4 und 366 BaF_2 Szintillatorkristallen.

Somit wird mit diesem Detektorsystem ein Raumwinkel von fast 97% abgedeckt.

2.4. Szintillatoren

In Materie entstehen elektromagnetische Schauer durch hochenergetische Elektronen und Photonen [Leo87]. Gelangt ein hochenergetisches Photon in Materie so entsteht durch Paarbildung ein Positron-Elektron-Paar. Dafür muss das Photon mindestens eine Energie von $2 \cdot m_{e^-} = 1,022 \text{ MeV}$ besitzen. Diese Energie verteilt sich dann gleichmäßig auf das Elektron und das Positron. Da diese beiden Teilchen geladen sind und sich ihre Geschwindigkeit im elektromagnetischen Feld eines Atomkerns ändert, erzeugen sie durch Bremsstrahlung wieder Photonen. Diese Prozesse wiederholen sich, sodass ein Schauer entsteht, welcher sich kaskadenartig ausbreitet. Die Energien der Teilchen nehmen dabei immer weiter ab, bis die kritische Energie E_c erreicht wird. Bei dieser Energie entspricht der Energieverlust durch Bremsstrahlung dem Energieverlust, der durch Ionisation entsteht.

Fällt die Energie eines Elektron auf E_0/e , so wird die dafür benötigte Strecke X_0 Strahlungslänge genannt.

Nimmt man an, dass die Elektronen und die Photonen nach etwa einer Strahlungslänge wechselwirken, und dass die Teilchen jeweils die Hälfte ihrer Energie abgeben, so lässt sich die Gesamtzahl der Teilchen und die Energie eines einzelnen Teilchen nach t Kaskaden berechnen durch[Leo87]:

$$N \approx 2^t \quad (2.3)$$

$$E(t) \approx \frac{E_0}{2^t} \quad (2.4)$$

Dieser Schauer breitet sich, sowohl in longitudinaler als auch transversaler Richtung aus. Diese kann durch den Molière-Radius beschrieben werden.

Der Molière-Radius wird berechnet durch [Leo87]:

$$R_M = 21 \text{ MeV} \cdot \frac{X_0}{E_c} \quad (2.5)$$

95% aller im Schauer entstandenen Teilchen, befinden sich innerhalb von zwei Molière-Radien.

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

2.5. Clustering Algorithmus

Wie bereits in Abschnitt 2.4 erwähnt wurde, breitet sich ein elektromagnetischer Schauer aus Elektronen Positronen und Photonen aus, wenn ein Photonen einen Detektorkristall trifft. Dieser Schauer breitet sich aus und dringt in benachbarte Kristalle ein. Folglich wird nicht die gesamte Energie eines Photons an einen Kristall abgegeben, sondern immer auch an seine Nachbarn.

Damit ein Kristall als ausgelöst eingestuft wird, müssen zwei Bedingungen erfüllt werden.

Das Analogsignal des Photomultipliers muss die eingestellte Diskriminatorschwelle von jeweils 1,1 MeV und eine Energieschwelle, welche in der Analyse gesetzt wird, überschreiten.

Sind diese beiden Bedingungen erfüllt, wird der Kristall in der weiteren Analyse mit einbezogen.

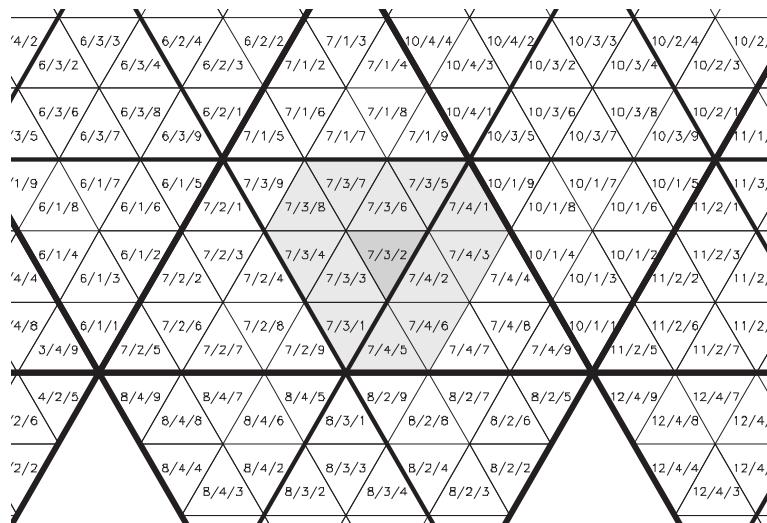


Abbildung 2.5.: Cluster 7/3/2 (dunkelgrau) stellt beispielhaft einen Zentralkristall dar. Seine nächsten Nachbarn sind hellgrau unterlegt. Sie liegen ringförmig um den Zentrale Kristall [Un08].

Zunächst wird der Kristall gesucht, der den höchsten Energiebetrag hat. Dieser wird als Zentralkristall im Cluster gesetzt. In Abbildung 2.5 ist dieser dunkelgrau unterlegt. Zu dieser Energie wird die Energie seiner nächsten (maximal 12) Nachbarn aufaddiert. Diese nächsten Nachbarn sind hellgrau unterlegt. Als nächster Kristall ist ein Kristall definiert, wenn er den zentralen Kristall mit mindestens einer Ecke berührt. Folglich besitzen Detektoren am Rand des Strahlenein- bzw. -ausgangs weniger nächste Nachbarn.

Innerhalb dieser 13 Kristalle wird 98% der Energie deponiert [Un08]. Um den genauen Auftreffort \vec{r}_{Cl} zu bestimmen, benutzt man nicht nur die Lage des zentralen Kristalls.

2. Experimenteller Aufbau am MAMI

Stattdessen werden alle im Cluster miteinbezogene Kristalle berücksichtigt.

$$\vec{r}_{Cl} = \frac{\sum_i \vec{r}_i \sqrt{E_i}}{\sum_i \sqrt{E_i}} \quad (2.6)$$

Dabei ist \vec{r}_i eines Kristalls im Cluster und E_i die von diesem Kristall gemessene Energie. Außerdem wird mit der Wurzel der Energie der einzelnen Kristalle gewichtet.

3. Vorbereitung

3.1. Umstellung auf die Crystal-Ball-Fitfunktion

Um die Masse des π^0 zu bestimmen, werden Histogramme erzeugt. Auf einer Achse dieser Histogramme wird die errechnete invariante Masse aufgetragen. Anschließend wird über diese Histogramme mit einer Funktion gefittet.

Zum Fitten wurde zunächst auf ein bereits existierendes Fitmodul zurückgegriffen. Dieses ist eine Summe aus einer Gaußfunktion und einem Polynom vierten Grades. Allerdings entspricht die Form des π^0 -Peaks nicht der einer Gaußverteilung, weswegen nach einer alternativen Fitfunktion gesucht werden muss.

Bei dieser neuen Funktion handelt es sich um die Crystal-Ball-Funktion, welche nach der Crystal-Ball Kollaboration benannt ist. Diese Funktion ist eine Dichtefunktion einer asymmetrischen Wahrscheinlichkeitsverteilung und ist in zwei Bereiche aufgeteilt. Im zentralen Bereich entspricht sie einer Gaußform, diese geht für kleine Werte in eine Potenzreihe über.

$$f(x|\alpha, n, \bar{x}, \sigma) = N \begin{cases} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, & \text{falls } \frac{x-\bar{x}}{\sigma} > -\alpha \\ A(B - \frac{x-\bar{x}}{\sigma})^{-n}, & \text{falls } \frac{x-\bar{x}}{\sigma} \leq -\alpha \end{cases} \quad (3.1)$$

Dabei ist N der Normierungsfaktor, \bar{x} der Erwartungswert und σ die Standardabweichung der Gaußfunktion. Der Parameter α gibt die Position an, an dem die Gaußverteilung in das Potenzgesetz, mit dem freien Parameter n , übergeht[?].

ROOT stellt diese Funktion bereits größtenteils zur Verfügung, lediglich die Normierung muss noch hinzugefügt werden.

Der Untergrund wurde weiterhin mit einem Polynom vierten Grades angenähert, bevor die Crystal-Ball-Funktion angewandt wurde.

Zuerst wird der Untergrund mit einem Polynom vierten Grades gefittet, in Abbildung 3.1 blau dargestellt. Von den Daten kann dann damit der Untergrund abgezogen werden. Nun wird über die verbleibenden Daten der Crystal-Ball-Fit angewandt (Grün). Damit leichter überprüft werden konnte, ob der Fit sinnvoll war, wurde beide Fits addiert und zusätzlich in den Graphen gezeichnet (Rot).

3. Vorbereitung

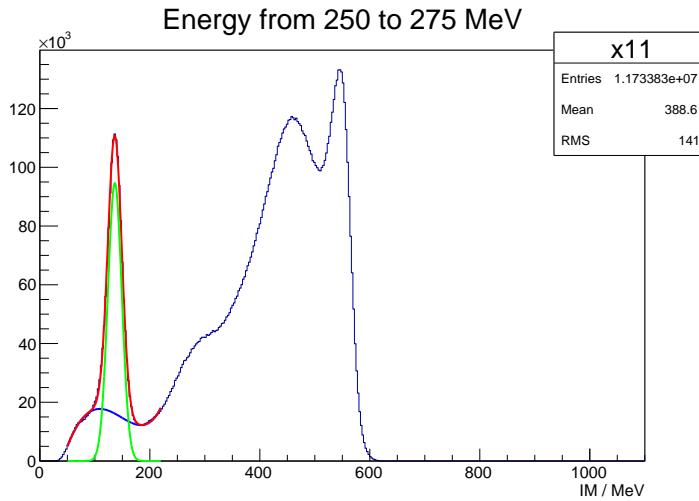


Abbildung 3.1.: Beispiel eines Fits. Es handelt sich dabei um das Photonenenergieintervall von 250 MeV bis 275 MeV mit der Bedingung, dass sich die Energie der Photonen im gleichen Intervall befanden. Zu erkennen ist der Untergrundfit (Blau), der Crystal-Ball-Fit (Grün) und die Addition der beiden Fits (Rot). Alle weiteren Fits mit dieser Bedingung sind in Abbildung A.1 zu sehen.

3.2. Reduzierung des Untergrunds

Im Crystal-Ball Detektor werden nicht nur Photonen, viele alle möglichen Teilchen detektiert. Folglich werden auch viele Teilchen registriert, die man nicht betrachten will. Diese erzeugen zusätzlich einen Untergrund, der die Genauigkeit des Fits verschlechtert.

Zu erahnen ist dies bereits in Abbildung 3.1. Hier ist der π^0 -Peak bei einer invarianten Masse von 135 MeV und der η -Peak bei ca. 550 MeV zu sehen. Sein Peak wird allerdings sehr stark durch den Untergrund gestört. Der Fokus dieser Arbeit lag zwar bei der Betrachtung des π^0 , allerdings war es auch interessant die Position des η -Peaks zu betrachten, daher wurde nach einem Weg gesucht, den Untergrund möglichst stark zu reduzieren.

Daher wurde nun auch überprüft, ob die detektierten Teilchen eine Ladung besaßen. Möglich ist dies durch den PID-Detektor. Sind die detektierten Teilchen geladen, dann handelt es sich nicht um Photonen und sie werden verworfen. Dies führt zu einer Reduzierung des Untergrunds. Zu sehen ist das in Abbildung 3.2.

Hier erkennt man direkt, dass sich der Untergrund vermindert hat, sodass die beiden Peaks deutlich zu erkennen sind. Daraus folgt, dass auch besser über diese Peaks gefittet werden kann, was zur Folge hat, dass

3. Vorbereitung

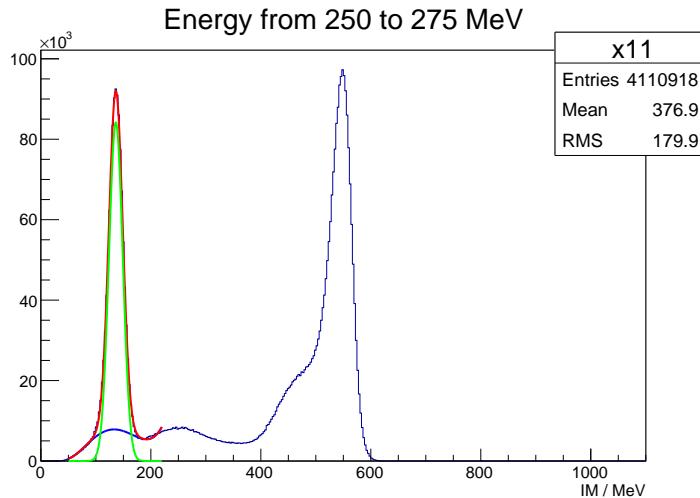


Abbildung 3.2.: Beispiel eines Fits mit reduziertem Untergrund. Sowohl der π^0 -Peak bei 135 MeV, auch als der η -Peak bei 550 MeV sind deutlich zu erkennen. Alle Fits zur dieser Bedingung sind in A.2 zu sehen.

3.3. Umstellung auf einen neuen Ereignisgenerator

Da viele Informationen über die Prozesse nicht im Detektor bestimmt werden können, ist es hilfreich, auf Simulationen zurückzugreifen. Dafür liegen verschiedene Software-pakete zur Verfügung, in denen unterschiedliche Prozesse simuliert wurden.

So gibt es bereits vorgefertigte Pakete, wie den Cocktail. Im diesem sind ca. 250 Millionen Prozesse aus Photoproduktion enthalten. Allerdings sind im Cocktail nicht nur $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ enthalten.

Die Zerfälle im Cocktail sind bereits komplett durchsimuliert. Das heißt, sowohl der Zerfall der Teilchen, als auch das Verhalten der Detektoren wurde simuliert, wodurch der Cocktail wie eine reale Strahlzeit behandelt werden kann.

Da in dieser Arbeit der Hauptaugenmerk auf Photonen liegt, die eine ähnliche Energie besitzen, stellte sich relativ schnell heraus, dass der Cocktail nicht genug relevante Prozesse enthält, nachdem alle unerwünschten heraus gefiltert wurden.

Deshalb wurde zunächst ein neues Paket mit mehr Prozessen erstellt. Dieses Paket beinhaltet $10^7 \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ Prozesse, welche durch Pluto, eine Monte-Carlo basierende Simulation, generiert wurden. Das Verhalten des Crystal-Ball Detektors wurde mittels GEANT4¹, einer Simulation, welche das Durchdringen von Teilchen durch Materie beschreibt, simuliert.

Das Erstellen dieses neuen Paketes nahm sehr viel Zeit in Anspruch, da das Simulieren der Detektoren sehr aufwändig ist. So dauert das Erstellen eines Paketes mit 10^5 Prozessen etwa zwei Stunden. Da nur Photonen mit einer ähnlichen Energie betrachtet

¹Geometry And Tracking

3. Vorbereitung

werden, müssen auch von diesem Paket die meisten Zerfälle verworfen werden. So kommt es, dass selbst das Paket mit 10 Millionen Prozessen nicht genug Photonenpaare mit ähnlicher Energie enthält, da vor allem in Kapitel 4.2.3 sehr viele Prozesse benötigt werden.

Um nun aber eine noch größere Simulation zu vermeiden, wurde ein neuer Ereignisgenerator geschrieben, bei dem die gewünschten Bedingungen bereits im Eventgenerator Pluto für einen Filter sorgten, sodass die Teilchen, welche sowieso verworfen wären, gar nicht erst durch GEANT simuliert wurden.

Damit der neue Ereignisgenerator auch alle relevanten Informationen beinhaltet, muss folgender Prozess betrachtet werden.



Da die einfallenden Photonen durch Bremsstrahlung erzeugt werden, sind ihre Energien nicht eindeutig, sondern liegen in einem gewissen Intervall. Also muss als erstes die Energie der eingehenden Photonen gewürfelt werden.

Dann begibt man sich ins Schwerpunktsystem des einfallenden Photons und des ruhenden Protons p . Von diesem System kann dann die Schwerpunktsenergie \sqrt{s} ausgerechnet werden.

$$\sqrt{s} = \sqrt{2E_\gamma m_p + 2m_p^2} \quad (3.3)$$

Anschließend wird angenommen, dass die Reaktion des Protons mit dem Photon ein π^0 aussendet. Die Richtung in der dieses π^0 ausgesandt wird, wird auch wieder mit einem Zufallsgenerator bestimmt. Die Richtung ist also im Raum gleichverteilt.

Aufgrund der Impulserhaltung muss gelten, dass der Impuls des Protons in die entgegengesetzte Richtung zum π^0 zeigt, und dass der Betrag der beiden Impulse gleich sein muss. Auch muss aufgrund der Energieerhaltung gelten, dass die Energie der beiden Teilchen addiert gleich der Schwerpunktsenergie ist. Es liegen also die folgenden Formeln vor:

$$|\vec{p}_{\pi^0}| = |\vec{p}_p| = |\vec{p}'| \text{ und } \sqrt{s} = \sqrt{m_{\pi^0}^2 + \vec{p}'^2} + \sqrt{m_p^2 + \vec{p}'^2} \quad (3.4)$$

Diese Gleichung kann nach dem Impuls $|\vec{p}'|$ aufgelöst werden. Da die Masse der beiden Teilchen bekannt ist, kann ihr Impuls und damit auch ihre Energie über $E = \sqrt{m^2 + p^2}$ ausgerechnet werden.

Weiter muss angenommen werden, dass das π^0 instantan in zwei Photonen zerfällt. Diese Annahme ist nicht abwegig, da die Lebenszeit eines π^0 nur etwa $8,5 \cdot 10^{-17}$ Sekunden beträgt. Somit zerfällt es bereits nach wenigen Nanometern. Also ist die Annahme berechtigt.

Um die aus dem Zerfall entstandenen Photonen zu erzeugen, begibt man sich nun in das Ruhesystem des π^0 . Dann wird eine zufällige Richtung bestimmt, in dem ein Photon ausgestrahlt wird. Das andere Photon wird in die genau entgegengesetzte Richtung ausgestrahlt. Anschließend verlässt man wieder das Ruhesystem, dazu

3. Vorbereitung

erhalten die beiden Photonen den Boost des π^0 .

In diesem Tool wird die Energie des Strahls in einem homogenen Intervall gewürfelt. Dies entspricht nicht der Realität, da die Energieverteilung von Photonen, welche durch Bremsstrahlung erzeugt werden, nicht gleichmäßig ist, sondern in dem im Experiment betrachtetem Intervall eher an eine $1/E_\gamma$ -Verteilung erinnert. Folglich werden mit diesem neuen Tool deutlich mehr hochenergetische Bremsstrahlphotonen erzeugt. Dies stört allerdings nicht weiter, da in diesen Untersuchungen nur sichergestellt werden muss, dass alle im Experiment auftretenden Photonen auch in der Simulation auftreten.

Da in vielen Schritten eine Raumrichtung oder ein Energieintervall gewürfelt werden muss und der neue Ereignisgenerator auf einem alten basiert, wurde zunächst auf den bereits benutzten Zufallsgenerator aus ROOT namens TRandom zurückgegriffen. Dieser besitzt eine Periodizität von 10^9 und benötigt zum Generieren einer Zahl 34 ns. Allerdings stellte sich heraus, dass dieser Zufallsgenerator nicht gut für viele größere Pakete geeignet ist, da durch ihn keine gleichmäßige Verteilung, sondern 'Nadeln' entstehen, was darauf hindeutet, dass der Generator immer wieder die gleichen Prozesse würfelt (vgl. dazu das linke Bild von Abb. 3.3).

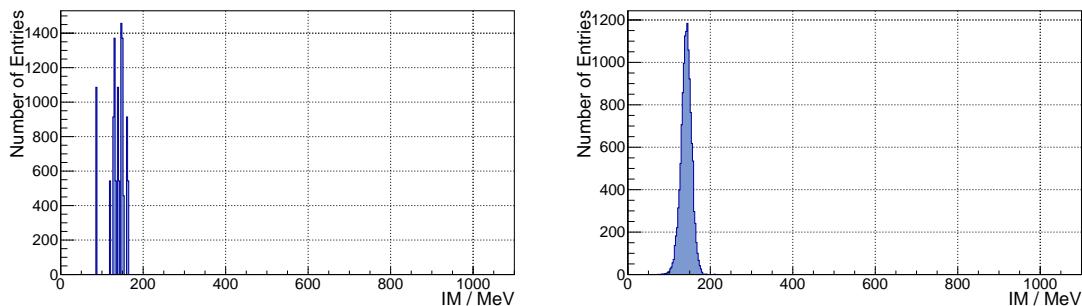


Abbildung 3.3.: Beispiel für durch die Gun generierten Verteilungen. Links wurde das Paket TRandom und rechts TRandom3 benutzt. Man erkennt direkt eine deutliche Verbesserung der Verteilung von TRandom auf TRandom3. Es handelte sich dabei jeweils um das Histogramm für symmetrische Photonen mit einer Energie von 375 MeV bis 400 MeV und einem Z-Vertex von -5 cm bis -4 cm. Für weitere Details zur Vertex Aufteilung siehe Kapitel 4.2.3

Folglich musste er ausgetauscht und durch den ebenfalls von ROOT bereitgestellten Zufallsgenerator namens TRandom3 ersetzt werden. Dieser besitzt mit 10^{6000} eine deutlich höhere Periodizität als TRandom. Zwar benötigt er mit 45 ns pro gewürfelter Zahl etwas mehr Zeit, dafür entspricht die Verteilung mehr der erwarteten. Zu sehen ist dies rechts in der Abbildung.

Schließlich muss noch überprüft werden, ob der neue Ereignisgenerator so wie der alte

3. Vorbereitung

funktioniert. Dazu wurde der alte Generator so eingestellt, dass die Energieverteilung des eintreffenden Photonenstrahls homogen verteilt ist. Dadurch war ein einfacherer Vergleich möglich.

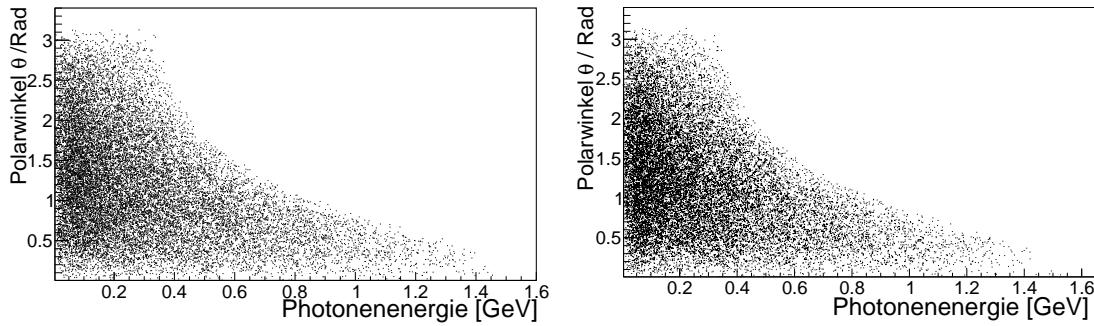


Abbildung 3.4.: Links wird der neue und rechts der alte Ereignisgenerator benutzt. Aufgetragen ist der θ -Winkel in rad gegen die Energie in GeV der durch den Zerfall ausgesandten Photonen. Die beiden Pakete beinhalten jeweils 100000 Ereignisse.

In den Plots von Abbildung 3.4 ist der θ -Winkel der durch den π^0 -Zerfall ausgesandten Photonen gegen ihre Energie aufgetragen. Man erkennt, dass sich die Verteilung sehr stark ähneln, was darauf hindeutet, dass beide Ereignisgeneratoren gleich funktionieren.

Als letzte Absicherung wird aus den im Ereignisgenerator bestimmten Werten für die Energie der Photonen und ihrem Öffnungswinkel die invariante Masse des π^0 berechnet. Zu sehen ist das in Abb. 3.5

Wie zu erwarten war, liegt keine Abweichung vor, wenn man mit den Daten aus der Gun direkt die Masse berechnet, da hier die Detektorauflösung noch nicht beitragen hat.

Also konnte angenommen werden, dass die neue π^0 -Gun wie gewünscht funktionierte.

3. Vorbereitung

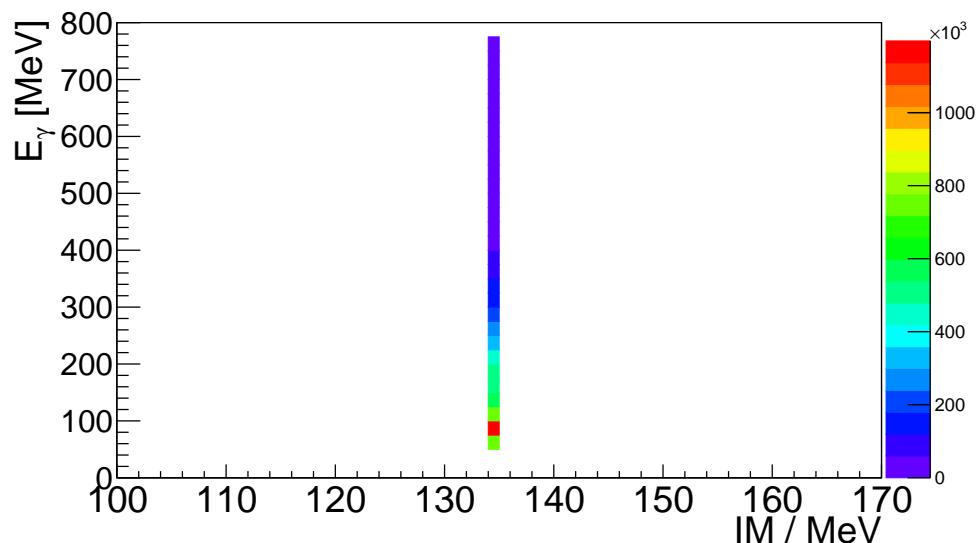


Abbildung 3.5.: Direkte Berechnung der π^0 -Masse aus den Daten des neuen Ereignisgeneratoren. Es wurden nur Photonen mit einer ähnlichen Energie benutzt.

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

Zerfällt ein π^0 , so werden nach Reaktion 1.2 zwei Photonen frei. Diese Photonen werden an der A2 durch den Crystal-Ball Detektor nachgewiesen. Dabei wird, sowohl der Winkel zwischen den beiden Photonen, als auch die Energie der Photonen bestimmt, um die invariante Masse des π^0 ausrechnen zu können.

Zur Analyse wird Ant¹ benutzt. Mit diesem Programm konnten auch alle gewünschten Bedingungen eingestellt werden.

Eine Kalibration ist notwendig, um zu einem gegebenen Wert einen Umrechnungsfaktor zu bestimmen, der die gemessene Ladung in physikalisch aussagekräftige Werte, zum Beispiel MeV oder ns, umrechnet. Diese Umrechnungsfaktoren müssen für jeden Detektorkristall einzeln bestimmt werden [Un08].

4.1. Strahlzeit

Im folgenden Abschnitt werden die gemessenen Daten aus der Strahlzeit Oktober 2014 verwendet. Die Strahlenergie beträgt 1604 MeV.

4.1.1. Energie Abhängigkeit

Als erstes wird überprüft, ob eine Abhängigkeit der Kalibrierung im Bereich verschiedener Energieintervalle vorliegt. Sprich, stimmt die Kalibrierung auch dann noch, wenn die Energie der beiden detektierten Photonen sich ähnelte. Das heißt, die Differenz der Energie der beiden Photonen beträgt maximal 25 MeV. Diese Bedingung wird eingeführt, da man auf diese Weise herausfinden kann, ob die Kalibrierung auch noch für zum Beispiel zwei hoch energetische Photonen stimmt, da man weiß, dass beide Photonen eine hohe Energie besitzen. Anders kann die Folgerung nicht getroffen werden, da man sonst eine '*Mischung*' der Energien hat und man nicht sagen kann, welcher Effekt durch welche Energie verursacht wird.

Zur Untersuchung können dann aus den Daten der Strahlzeit, die invariante Masse des π^0 mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$m_{\pi^0} = \sqrt{2E_1E_2(1 - \cos(\alpha))} \quad (4.1)$$

¹Analysis Toolkit

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

Hier ist m_{π^0} die berechnete Masse aus den beiden Energien E_1 und E_2 der Photonen. α ist der Öffnungswinkel zwischen den beiden Photonen. Um diesen zu berechnen muss angenommen werden, dass das Pion im Ursprung zerfällt. Mehr dazu in Abschnitt 4.2.3. Die Herleitung der Gleichung 4.1 befindet sich im Anhang A.1.

Mit diesen Daten kann schließlich ein zweidimensionales Histogramm mit der invarianten Masse auf der x-Achse angelegt werden. Auf der y-Achse ist die Energie der Photonen aufgetragen, welche in Intervalle mit einer Breite von 25 MeV unterteilt ist.

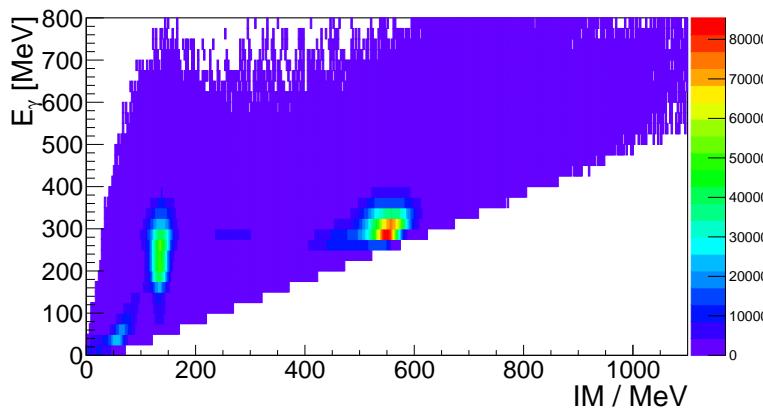


Abbildung 4.1.: Daten aus der Strahlzeit: Auf der x-Achse ist die errechnete invariante Masse aufgetragen, die y-Achse ist in 25 MeV Intervalle aufgeteilt. Es werden nur Photonen berücksichtigt, die sich energetisch ähneln. Das heißt ihre Energie unterscheidet sich maximal um 25 MeV.

Beim Füllen des Histogramms wird darauf geachtet, dass sich die Energien der beiden Photonen um maximal 25 MeV unterscheiden.

Im folgenden werden nur die Energieintervalle für Photonen von 125 MeV bis 425 MeV berücksichtigt.

Dieser Bereich ist bewusst gewählt, da für kleinere Energien der Peak des π^0 zu stark durch das Rauschen gestört wird und somit die Position nicht eindeutig bestimmt werden kann. Für Energien oberhalb von 425 MeV liegen nicht mehr genug Ereignisse vor, sodass auch höhere Energieintervalle ebenfalls verworfen werden müssen.

Um nun die Position des π^0 zu bestimmen, wird für jedes Intervall über den Bereich der errechneten invarianten Masse von 50 MeV bis 220 MeV mit Hilfe von ROOT gefittet. Die Einschränkung des Bereichs ermöglichte einen besseren Fit. Als Fitfunktion wird die Crystal-Ball-Funktion (Kapitel: 3.1) verwendet. Aus diesen Fitdaten kann dann die Position des π^0 bestimmt werden.

Um die Abweichung der rekonstruierten Masse zur π^0 Masse zu bestimmen wird folgende Gleichung angewandt.

$$A = \left(\frac{m_{rec}}{m_{\pi^0}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (4.2)$$

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

Dabei ist m_{rec} die rekonstruierte Masse und m_{π^0} die tatsächliche Masse. Die Abweichung A gibt den Unterschied zwischen den beiden in Prozent an.

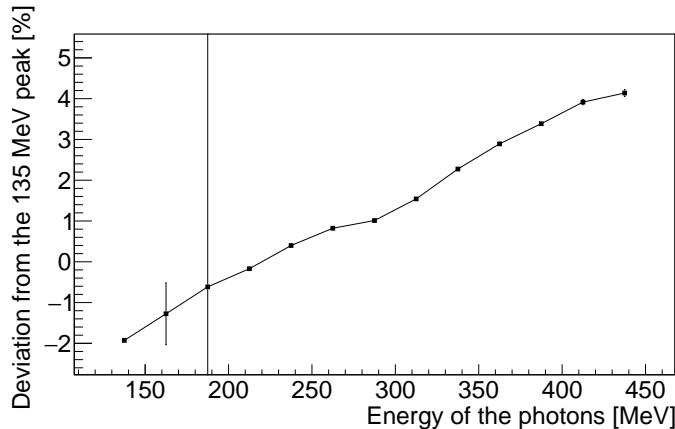


Abbildung 4.2.: Daten aus der Strahlzeit: Die errechnete Position des π^0 Peaks ist gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Es gilt die Bedingung, dass die gemessenen Teilchen ungeladen sein müssen und dass die Energie der Photonen sich ähneln muss. Alle Fits sind in Abbildung A.2 zu sehen. Die Unzoomed Abbildung ist in A.3 zu sehen.

In Abbildung 4.2 sind die errechneten Abweichungen der invarianten Masse des π^0 gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Zu sehen ist eine deutliche Abweichung zum Literaturwert des π^0 Peaks für hohe Energien.

Für eine Photonenenergie von ungefähr 125 MeV liegt eine leichte Abweichung von weniger als -1% vor. Hier ist die errechnete Masse zu klein. Allerdings nimmt die Abweichung bei steigender Photonenenergie mit einer *Steigung* von ca. +1% pro 50 MeV im Intervall von 150 MeV bis 300 MeV zu, sodass hier eine Abweichung von etwa +2% erreicht wird. Ab 300 MeV nimmt die Abweichung mit fast +2% deutlich stärker zu bis es schließlich bei einer Photonenenergie von 375 MeV abflacht. Die maximale Abweichung wird bei einer Photonenenergie von 400 MeV erreicht und beträgt fast +6%.

Auch fällt auf, dass die Abweichung fast durchgehend positiv ist. Daraus folgt, dass in der Regel eine zu große invariante Masse berechnet wird.

Daraus folgt, dass eine Abhängigkeit zwischen der Position des π^0 -Peaks und der Energie der Photonen vorliegt. In den folgenden Abschnitten wird versucht, die Ursache für diese Abhängigkeit zu bestimmen.

4.1.2. Vernachlässigung der Detektoren am Rand

Als Ursprung der in Kapitel 4.1.1 ermittelten Abweichung wird zunächst der Aufbau des Crystal-Balls vermutet. Genauer gesagt, der Strahlein und -ausgang. Denn

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

durch diese haben die Detektoren im Crystal-Ball nicht alle gleich viele Nachbardetektoren und da ein Photon seine gesamte Energie nicht an einen Detektorkristall abgibt, sondern immer auch an seine Nachbarn, können diese Randdetektoren nicht ideal kalibriert werden und damit können die Schauer am Rand nicht unverfälscht gemessen werden.

Zusätzlich zu den in Kapitel 4.1.1 geltenden Bedingungen wird noch die Bedingung hinzugefügt, dass die Detektoren am Rand des Strahlenein- und ausgangs nicht betrachtet werden. Dies erreicht man dadurch, dass alle Reaktionen, die ein oder mehrere Photonen besitzen, welche einen Winkel von 30° oder weniger zur Strahlenachse haben, verwerfen wurden. Diese Gradzahl wurde durch eine grobe Abschätzung errechnet. Die Öffnungen für den Strahlenein- und ausgang haben einen Radius von 2 Detektoren, und erstrecken sich über einen Polarwinkel von ca. 20° . Folglich hätte ein Ring aus Detektoren um diese Öffnungen einen Polarwinkel von 10° .

Auch für diese Bedingung wird anschließend ein Histogramm angelegt (Abb.: A.4) und die einzelnen Positionen werden gefittet (Abbildung: A.5), um die Position des π^0 zu bestimmen. Das Energieintervall das betrachtet und gefittet wird entspricht dem aus Kapitel 4.1.1, damit ein ist ein besserer Vergleich zwischen den verschiedenen Effekte möglich.

Zum besseren Vergleich der beiden Ergebnisse werden die relative Abweichungen mit und ohne Bedingung zusammen in einen Graphen gezeichnet.

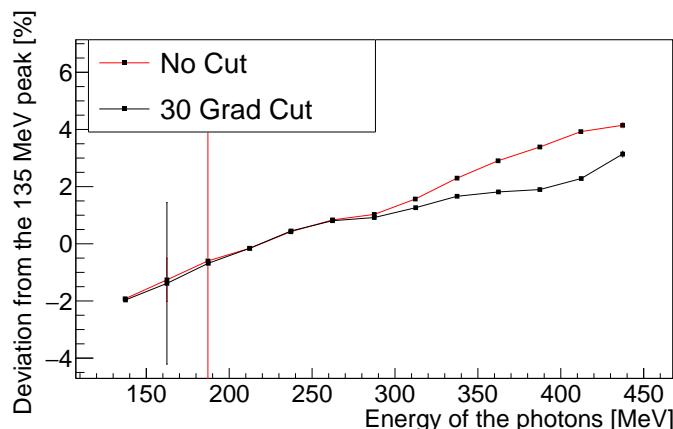


Abbildung 4.3.: Daten aus der Strahlzeit: Die relative Abweichung ist in Prozent gegen die Energie der Photonen gezeichnet. Die rote Linie stellt die relative Abweichung ohne die Bedingung, dass Photonen mit einem Winkel kleiner als 30° verworfen wurden, die schwarze Linie mit der Bedingung. Die detektierten Photonen müssen sich energetisch ähneln.

In der Abbildung 4.3 erkennt man, dass der Unterschied der beiden Betrachtungen für Photonenenergien unterhalb von 275 MeV nur sehr klein ist. Bei einem so kleinen Unterschied kann man nicht mit Gewissheit sagen, dass der Cut bei 30° eine Ver-

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

besserung der π^0 -Peak Position bewirkt hat. Die Differenz ist noch im Bereich der statistischen Fluktuation.

Für Photonenergien oberhalb von ca. 275 MeV ist eine deutliche Verbesserung der Abweichung zu erkennen. So liegt bei einer Photonenergie von 400 MeV mit Detektoren am Rand eine Abweichung der errechneten π^0 -Peakposition zur invarianten Masse des π^0 von fast 6% vor, während die Abweichung bei gleicher Photonenergie ohne Detektoren am Rand nur fast 4% beträgt.

Ein vermuteter Grund, warum es nur eine Verbesserung für hohe Energien gibt, ist, dass hochenergetische Photonen dann erzeugt werden, wenn auch das Pion eine hohe kinetische Energie besaß. Diese Photonen haben dann eine größere Wahrscheinlichkeit in Richtung des Strahlausgangs des Crystal-Balls aufzutreten.

Um das zu erklären betrachtet man zunächst ein ruhendes π^0 . Dieses zerfällt in 2 Photonen in zufälliger Richtung mit einem Winkel von 180° zueinander und mit einer Energie von jeweils etwa 67,5 MeV.

Gibt man dem π^0 nun einen Boost in z -Richtung, so erhalten auch die beiden Photonen einen Boost in diese Richtung. Zur Veranschaulichung betrachtet man nun zwei extreme Beispiele:

1. Im Ruhesystem des π^0 werden die Photonen in einem Winkel von 90° zur Strahlenachse ausgesandt. Wird nun ein Boost in z -Richtung angewandt, so erhalten beide Photonen einen gleich großen Impuls in z -Richtung und haben folglich beide die gleiche Energie und den gleichen Winkel zur z -Achse. Dieser Winkel wird kleiner, wenn der Boost stärker wird.
2. Werden die Photonen allerdings entlang der z -Achse ausgesandt, so bewirkt ein Boost in z -Richtung nun, dass das Photon in z -Richtung Energie dazu erhält, während das Photon entgegengesetzt zur z -Richtung Energie 'verliert'. Die Energiendifferenz nimmt also zu.

Für höhere Photonenergien werden diese Effekte verstärkt und alles in allem werden mehr Photonen in Strahlenrichtung gemessen. Daraus folgt, dass Photonen mit niedriger Energie sich eher gleichmäßig im Raum verteilen, während hochenergetische Photonen häufiger am Strahlausgang des Crystal-Balls auftreten. Beachte, dass es sich hier um Photonen mit ähnlicher Energie handelt.

Dies führte auch zu einem weiteren Problem. Dadurch, dass die höher energetischen Photonen wahrscheinlicher am Strahlausgang vorliegen, werden nicht alle Detektoren im Crystal-Ball gleich berücksichtigt. So liegen, am Strahleneingang fast keine hochenergetischen Photonen vor.

In den Plots in Abbildung 4.4 erkennt man sehr gut, wie sich die Verteilung der Photonen ändert, wenn die Energie der Photonen zunimmt und die Bedingung gilt, dass sich die Energie der Photonen ähneln müssen. So sind die Photonen für kleine Energien über den ganzen Crystal-Ball verteilt, während für größere Energien die Photonen immer häufiger am Strahlausgang auftreten. In dieser Abbildung gibt es einen Cut auf die Masse des π^0 . Das bedeutet, die beiden detektierten Photonen

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

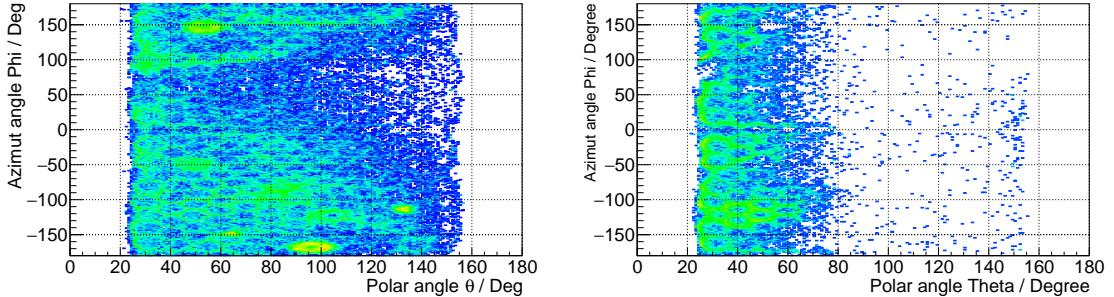


Abbildung 4.4.: Daten aus der Strahlzeit: Links ist die Verteilung der Photonen im Crystal-Ball mit einer Energie von 125 MeV bis 150 MeV zu sehen, rechts von 400 MeV bis 425 MeV. Es werden nur Photonen mit einer ähnlichen Energie berücksichtigt. Die errechnete Invariante Masse muss zwischen 70 MeV und 200 MeV liegen.

werden nur in das Histogramm eingetragen, wenn die aus diesen berechnete invariante Masse zwischen 70 MeV und 200 MeV liegt.

Aus der Verbesserung der Abweichung für hohe Photonenergien und unter Vernachlässigung der Detektoren am Rand liegt die Vermutung nahe, dass die Detektoren am Rand des Strahleneingangs nicht sehr gut für hohe Photonenergien kalibriert sind. Allerdings war damit nicht die gesamte Abweichung zu erklären. Aussagen über die Detektoren am Strahleneingang können ebenfalls nicht getroffen werden, da diese, im Vergleich zum Strahleneingang, nur sehr selten getroffen werden.

Also muss weiter nach der Ursache für diese starke Abweichung gesucht werden.

4.2. Simulation

Da mit reellen Daten keine Ursache gefunden werden kann, wodurch diese große Abweichung entsteht, wird auf simulierte Daten zurückgegriffen.

Der Grund dafür ist, dass alle Prozesse in simulierten Daten genau bekannt sind. Das heißt, von jedem registriertem Teilchen ist bekannt, um welches Teilchen es sich handelt und aus welchem Prozess es entstanden ist.

So kann der ganze Zerfall Schritt für Schritt auseinander genommen werden, um leichter nach der Ursache für die Abweichung zu suchen.

Als erstes muss überprüft werden, ob die in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 gefundene Abhängigkeit auch in der Simulation auftritt. Dazu werden zwei Histogramme mit den Bedingungen aus den jeweiligen Kapiteln gefüllt. Eins mit den Detektoren am Rand (Abb. 4.5 links) und eins ohne (Abb. A.6).

Anschließend wird über diese dann auch wieder mit der Crystal-Ball-Funktion gefititet, um die π^0 Position zu bestimmen. Alle Fits ohne Detektoren am Rand sind in Abbildung A.7 und alle Fits mit Detektoren am Rand in Abbildung A.8 zu sehen.

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

Auch hier werden die beiden Abweichungen vom π^0 -Peak zum besseren Vergleich in einen einzelnen Graphen gezeichnet.

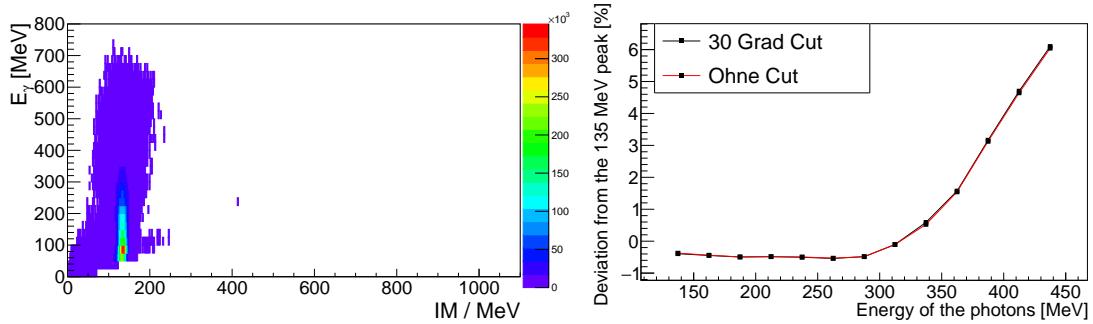


Abbildung 4.5.: Daten aus der Simulation: Links ist als Beispiel das Histogramm aus den simulierten Daten dargestellt. Für dieses Histogramm gilt die Bedingung, dass auch die Detektoren am Rand berücksichtigt werden. Rechts sind die Abweichungen vom π^0 -Peak mit (rot) und ohne (schwarz) Berücksichtigung der Detektoren am Rand zu sehen.

Schon am zweidimensionalem Histogramm aus Abbildung 4.5 ist zu erkennen, dass es sich um simulierte Daten handelte. Es liegt nur ein Peak bei der Masse von π^0 vor. Einen η -Peak und einen störenden Untergrund gibt es nicht.

Deswegen wird zur Bestimmung der π^0 -Position für die simulierten Daten der Untergrundfit ausgeschalten, sodass die Crystal-Ball-Funktion die einzige Fitfunktion ist. Ebenfalls ist die bei den reellen Daten gefundene Abweichung auch hier größtenteils zu erkennen. So war die Form sehr ähnlich, aber auch anders. So ist die Abweichung für kleine Photonenergien ebenfalls klein und weniger als -1%, nimmt aber auch für Energien bis 300 MeV nicht zu, sondern bleibt fast konstant. Für Energien oberhalb von 300 MeV nimmt die Abweichung mit über +2% pro 50 MeV zu. So wird die maximale Abweichung bei einer Photonenergie von 425 MeV erreicht. Hier beträgt sie 6%. Eine Abflachung, wie sie bei den Daten aus der Strahlzeit zu erkennen ist, liegt hier nicht vor.

Auch ergibt sich kein Unterschied in den Abweichung für simulierte Daten, wenn die Detektoren am Rand vernachlässigt werden. So muss dieser Grund dafür auch bestimmt werden. Folglich wird damit die Vermutung widerlegt, dass die Detektoren am Rand schlecht eingestellt sind.

Da nun aber trotzdem die Form der Abweichung bei den simulierten Daten ungefähr der Form der reellen Daten ähnelt, kann die Simulation benutzt werden, um ihre Ursache zu bestimmen.

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

4.2.1. Mindestwinkel zwischen detektierten Photonen

Als erstes wird überprüft, ob sich eine Verkleinerung der Abweichung ergibt, wenn man die Bedingung stellt, dass zwischen den beiden detektierten Photonen ein Mindestwinkel vorliegen muss. Wie bereits erwähnt, breitet sich ein Schauer im Detektor immer auch in longitudinaler Richtung aus. Also werden mehrere Detektoren durch ein einfallendes Photon ausgelöst. Es müssen die bereits in Abschnitt 2.5 gestellten Bedingungen erfüllt sein, damit ein Detektor als ausgelöst eingestuft wird.

Es ist allerdings auch möglich, dass ein Detektorkristall von zwei Photonen ausgelöst werden kann, wenn der Öffnungswinkel zwischen den beiden Photonen nicht groß genug ist, um eine Überlagerung zu vermeiden. Das führt dazu, dass die Energie der Photonen nicht exakt bestimmt werden kann, da die Aufteilung der berechneten Energie auf die beiden Photonen nicht eindeutig festgelegt werden kann.

Deswegen wird hier darauf geachtet, dass die registrierten Photonen einen Öffnungswinkel von mindestens 30° besitzen, um eine solche Überlagerung zu vermeiden. Die Energie der Photonen muss sich auch wieder ähneln.

Die Detektoren am Rand werden hier auch berücksichtigt, da sich dadurch keine Verbesserung in Kapitel 4.2 ergab.

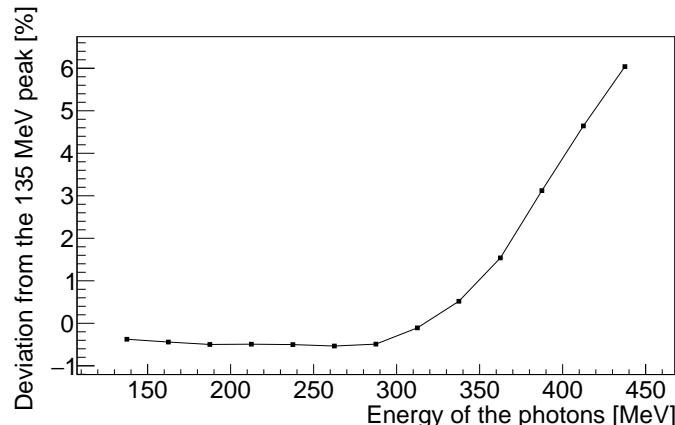


Abbildung 4.6.: Daten aus der Simulation: Long Target: Die Abweichung der π^0 -Peak Position mit der Bedingung, dass der Öffnungswinkel zwischen den beiden detektierten Teilchen mindestens 30° betrug. Alle Fits für diesen Plot befinden sich im Anhang (Abb.: A.19)

Wie in Abbildung 4.6 zu erkennen ist, ähnelt die hier bestimmte Abweichung sehr stark der bereits gefundenen in Kapitel 4.2.

Auch hier ist die Abweichung zunächst sehr klein und liegt etwas im negativen. Es liegt fast keine Änderung der Abweichung vor. Dies gilt bis zu einer Photonenenergie von 300 MeV. Ab einer Photonenenergie von über 300 MeV nimmt die Abweichung allerdings sehr stark zu. Die *Steigung* beträgt teilweise über 2% pro 50 MeV. Die maximale Abweichung wird bei einer Photonenenergie von 425 MeV erreicht und

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

beträgt ca. 6%.

Folglich ergibt die Bedingung, dass der Öffnungswinkel zwischen den beiden detektierten Photonen mindestens 30° sein muss, keine Verbesserung und es muss weiter nach einer Ursache für die Abweichung gesucht werden.

4.2.2. Isotoper Zerfall von π^0 im Ursprung

Als nächstes wird der einfachste Prozess überprüft. Dazu zerfällt ein π^0 im Ursprung und erhält einen Boost in eine zufällige Richtung. Dadurch gibt es keine ausgezeichnete Richtung. Folglich kann damit überprüft werden, ob sich alle Detektoren gleich verhalten.

Dazu wird die neue Ereignisgenerator so eingestellt, dass es keinen Photonenstrahl und kein Proton mehr gibt, lediglich der Boost des π^0 wird gewürfelt. Die Photonen werden dann anschließend, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, gewürfelt und geboostet. Als erste Kontrolle wird überprüft, ob die durch den Zerfall ausgesandten Photonen sich auch wirklich gleichmäßig im Raum verteilen.

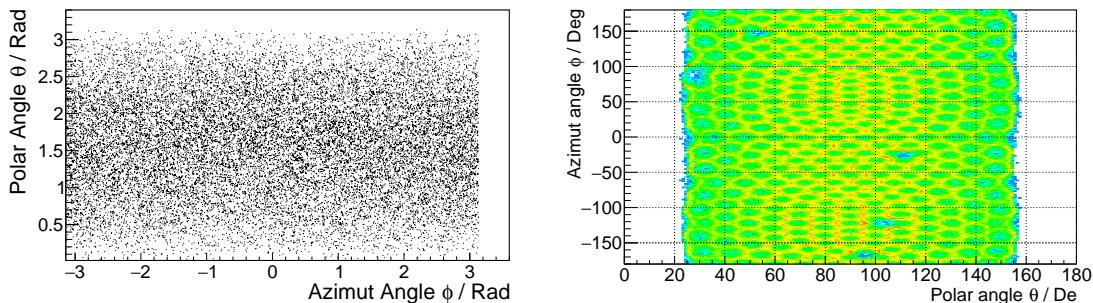


Abbildung 4.7.: Daten aus der Simulation: Ursprung: Isotroper Boost: Links ist die Verteilung der geboosteten π^0 im Raum zu erkennen. Die π^0 hatten keine Einschränkung in der Energie. Die Winkel hier sind in Radiant angegeben. Rechts ist der Ort dargestellt, an dem die Photonen den Crystal-Ball treffen. Dabei wird über die ausgelösten Detektoren gemittelt, sodass dieses Netzmuster entsteht. Die Photonen müssen sich energetisch ähneln. Außerdem werden nur Photonen mit einer Energie zwischen 125 MeV und 425 MeV berücksichtigt.

In Abbildung 4.7 links erkennt man, dass die π^0 einen Boost in eine zufällige Raumrichtung erhalten. Dadurch sind die durch den Zerfall ausgesandten Photonen isotrop im Raum verteilt. Zusätzlich gilt die Bedingung, wie in den vorherigen Kapiteln, dass nur Photonen mit einer ähnlichen Energie als Ereignis in die Datei geschrieben werden dürfen.

In GEANT wird zusätzlich die Länge des Target auf 0 cm gesetzt. Dadurch wird gewährleistet, dass die Pionen auch wirklich im Ursprung zerfallen.

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

Um zu überprüfen, ob alles wie gewollt eingestellt ist, wird ein weiteres zweidimensionales Histogramm angelegt.

In Abbildung 4.7 rechts sieht man, dass sich die Pionen gleichmäßig im Raum verteilen und es keine ausgezeichnete Richtung gibt. Also ist alles wie gewünscht eingestellt, wodurch das weitere Verhalten des Crystal-Balls betrachtet werden kann.

Nun wird wie in den vorherigen Kapiteln ein Histogramm mit den Photonen gefüllt (Abb. A.9) und anschließend wird über die verschiedenen Photonenergien gefittet. Dies wird sowohl mit, als auch ohne Berücksichtigung der Detektoren am Rand durchgeführt.

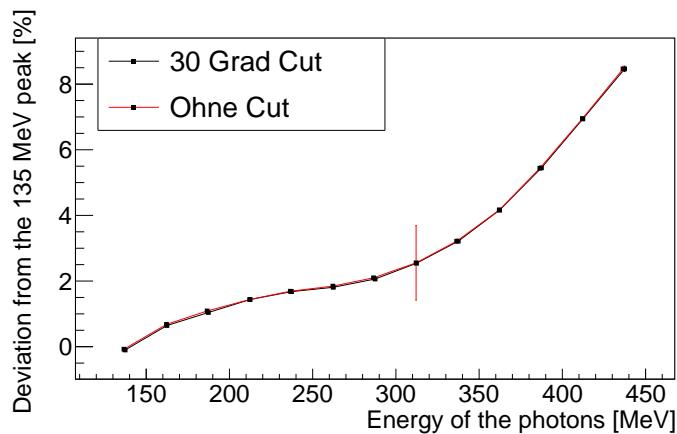


Abbildung 4.8.: Daten aus der Simulation: Ursprung: Isotroper Boost: Abweichung der errechneten invarianten Masse von der tatsächlichen π^0 Masse in Prozent. Bei der roten Linie wurden die Detektoren am Rand berücksichtigt, bei der schwarzen wurden sie vernachlässigt.

In der Abbildung 4.8 ist die Abweichung der errechneten invarianten Masse für verschiedene Photonenergien aufgetragen. Hier gibt es einen Ausreißer. Für eine Photonenergie von 300 MeV bis 325 MeV ohne Cut besitzt eine Abweichung sehr große Fehlerbalken. Allerdings kann man diese nicht nachvollziehen, wenn man sich den Fit betrachtet. Siehe dazu Abbildung A.13.

Die Form der Abweichung ähnelt sehr stark der aus Abbildung 4.5. Allerdings gibt es hier kein Plateau im Photonenergieintervall von 125 MeV bis 300 MeV, sondern es liegt hier eine sehr leichte *Steigung* von etwa +0.2% pro 50 MeV vor. Die maximale Abweichung liegt hier ebenfalls bei 425 MeV und beträgt fast +8%. Auch hier ist kein Unterschied zwischen den Abweichungen zu erkennen, wenn man die Detektoren am Rand berücksichtigt oder vernachlässigt.

Daraus folgt, dass auf eine andere Weise nach der Ursache für die Abweichung gesucht werden muss, da die starke Vereinfachung des zu untersuchenden Prozesses nicht weiter geholfen hat.

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

4.2.3. z -Vertex Abhängigkeit

Zusätzlich wird auch die Abhängigkeit, zwischen der errechneten Position des π^0 -Peaks und dem Ort im Target in dem das Pion entstanden und zerfallen ist, überprüft.

Da das π^0 nur wenige Nanometer zurücklegt, bevor es zerfällt, kann angenommen werden, dass das Pion am gleichen Ort zerfällt, an dem es auch entsteht.

Zur Untersuchung der z -Vertex Abhängigkeit wird das 10 cm lange Flüssig-Wasserstoff-Target im Zentrum des Crystal-Ball Detektor in zehn 1 cm lange Intervalle unterteilt. Im Zentrum des Targets befindet sich der Ursprung des Koordinatensystems, so liegt am Anfang des Targets das Intervall von $z=-5$ cm bis $z=-4$ cm, dann folgt $z=-4$ cm bis $z=-3$ cm usw.

Hier wird ein weiterer Vorteil der Simulation ausgenutzt. Aus den im Experiment genommenen Daten kann nämlich nicht der Ort bestimmt werden, an dem das π^0 zerfallen ist. Dafür gibt es keine Detektoren im Crystal-Ball. In Simulationen sind alle Prozesse allerdings wohl bekannt, so weiß man auch von jedem Prozess an welchem Ort er sich ereignet.

Anschließend wird ein dreidimensionales Histogramm angelegt mit den Intervallen des z -Vertex auf der z -Achse, der errechneten invarianten Masse auf der x -Achse und der Energie der Photonen auf der y -Achse angelegt. (Abb.: A.16). Die Detektoren am Rand werden nicht berücksichtigt.

Daraus kann dann die Position des π^0 -Peaks in Abhängigkeit zum z -Vertex Intervall berechnet werden, dazu wird jedes z -Intervall einzeln betrachtet und die Position abhängig von der Energie der Photonen berechnet. (Abb.: A.17) Diese 10 Z -Vertex Abhängigkeiten werden anschließend in Abbildung 4.9 eingetragen.

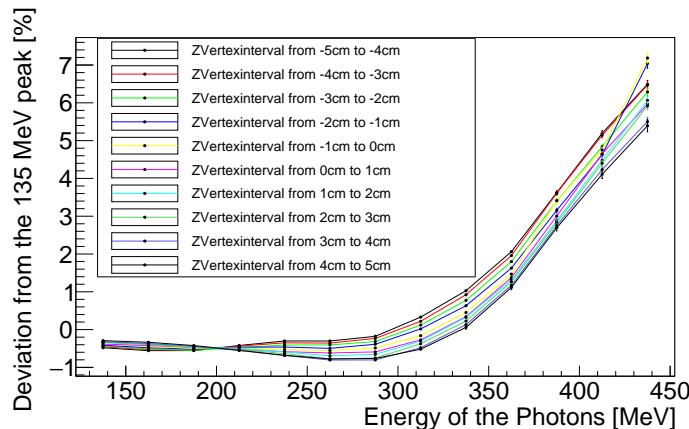


Abbildung 4.9.: Daten aus der Simulation: Die Abweichung der π^0 -Peak Position ist für verschiedene Intervalle des Z -Vertex gegen die Energie der gemessenen Photonen. Es werden die Detektoren am Rand vernachlässigt. Die Energie der Photonen muss sich ähneln.

Auch hier hat die Abweichung zwischen der errechneten invarianten Masse und der

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

π^0 Masse die gleiche Form, wie in den vorherigen Sektionen. So liegt nur eine geringe Abweichung für alle Z-Vertices bei niedrigen Photonenenergien vor. Diese beträgt maximal etwa nur -0,5%.

Die Abweichungen treffen sich alle bei einer Energie von etwa 200 MeV. Dort haben alle Z-Vertices eine Abweichung von etwa -0,5%. An diesem Punkt erfolgt eine Vertauschung der Ordnung der Z-Vertices. Vor 200 MeV hat das Intervall von 4 cm bis 5 cm die größte Abweichung und nach 200 MeV hat es die kleinste. Für das Intervall von -4 cm bis -5 cm gilt genau das Umgekehrte. Das liegt daran, dass für niedrige Photonenenergien auch das π^0 eine niedrige Energie besitzen muss. Das heißt es ist wahrscheinlich, dass das π^0 in entgegengesetzter Richtung zum Strahl ausgesandt wird, da es sonst mehr Energie besitzen würde. Somit kann es sein, dass die meisten gemessenen niederenergetischen Teilchen einen Polarwinkel besitzen, der größer als 90° ist. Folglich wird der Öffnungswinkel für π^0 die am Anfang des Targets entstehen, als zu groß angenommen. Für π^0 die am Ende des Targets entstehen wird, dann folglich ein zu kleiner Öffnungswinkel gemessen.

Bei einer Photonenenergie von über 200 MeV müssen die π^0 ebenfalls mehr Energie besitzen. Folglich werden mehr π^0 in Strahlrichtung betrachtet und somit werden mehr Photonen ebenfalls in Strahlrichtung ausgesandt. Die Photonenenergie von 200 MeV ist der Umkehrpunkt. Ab hier wird für ein am Anfang des Targets entstehendes π^0 ein zu kleiner Öffnungswinkel zwischen den ausgesandten Photonen gemessen und umgekehrt.

Ab 200 MeV fächert sich die Abweichung auch immer weiter auf. Bei 425 MeV beträgt sie fast 2%. Das wiederum bedeutet, dass die räumliche Ausdehnung des Target nur einen kleinen Effekt, im Gegensatz zur bereits festgestellten Abweichung besitzt.

Die maximale Abweichung wird ebenfalls bei 425 MeV erreicht und beträgt ca. 7%.

4.2.4. Unterschied zwischen generierten und gemessenen Winkeln

Es gibt die Vermutung, dass ein starker Unterschied, zwischen dem gemessenen und dem tatsächlichen Öffnungswinkel der beiden Photonen vorliegt.

Die Detektoren des Crystal-Balls sollen alle so ausgerichtet sein, dass sie in die Richtung des Zentrum des Targets zeigen, dieser liegt im Mittelpunkt der Kugel. Ist dies nicht der Fall, so wird ein falscher Öffnungswinkel zwischen den beiden Photonen bestimmt und damit nach Gleichung 4.1 eine falsche invariante Masse.

Um diesen Unterschied zu untersuchen, wird zuerst überprüft, ob ein von Null verschiedener Winkel zwischen dem generierten und dem gemessenen Teilchen vorliegt. Dafür muss bestimmt werden, welches generierte Teilchen zu den gemessenen gehört. Dazu hält man ein generiertes Teilchen fest und bestimmt anschließend den Winkel zwischen ihm und jedem gemessenen Teilchen. Wenn der Winkel am kleinsten ist, dann handelt es sich wahrscheinlich um das gleiche Teilchen. Danach wird dies für das nächste generierte Teilchen durchgeführt. Da der Crystal-Ball nicht den gesamten Raum abdeckt, sondern 'Löcher' ohne Detektoren besitzt, werden auch hier die Detektoren am Rand vernachlässigt. In den vorherigen Abschnitten mit Simulation kann kein Unterschied zwischen Berücksichtigung und Vernachlässigung der Detektoren am

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

Rand festgestellt werden, folglich können sie ohne große Bedenken vernachlässigt werden. Dies hat einen weiteren Vorteil. Dadurch können generierte Photonen, welche einen zu kleinen bzw. zu großen θ Winkel besitzen und damit nicht mehr im Crystal-Ball detektiert werden können, direkt verworfen werden. Das führt dazu, dass jedes generierte Photon auch im Crystal-Ball gemessen werden. Gäbe es diese Bedingung nicht, so würde ein generiertes Photon, welches nicht im Crystal-Ball detektiert wird, mit einem anderen Teilchen gleichgesetzt, da der Winkel zwischen diesen am kleinsten wäre. Dies würde das Ergebnis verfälschen.

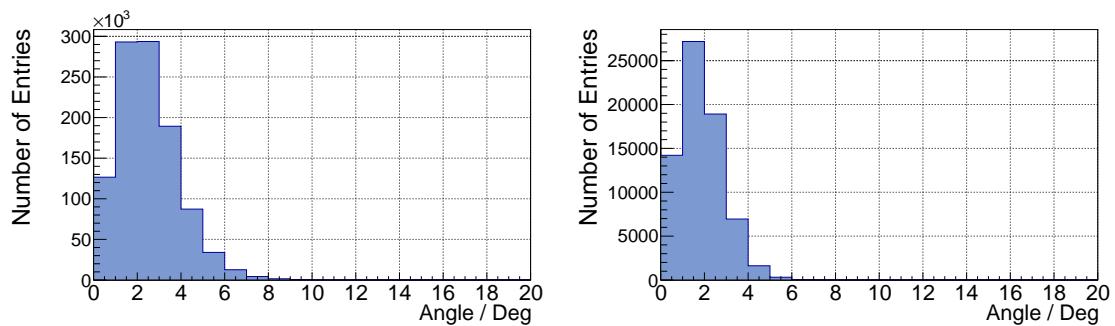


Abbildung 4.10.: Daten aus der Simulation: Es wird ein langes Target benutzt. Der Winkel zwischen dem generiertem und dem rekonstruiertem Photon ist gegen verschiedene Photonenenergien aufgetragen. Die die Energie der Photonen muss sich ähneln. Links besitzen die Photonen eine Energie von 125 MeV bis 150 Mev, während sie rechts eine Energie von 400 MeV bis 425 MeV besitzen. Das 2D-Histogramm ist in Abbildung A.14 zu sehen.

In Abbildung 4.10 ist der Winkel zwischen dem generierten Photon und dem gemessenen Photon gegen die Energie des gemessenen aufgetragen.

Links besitzen die Photonen eine Energie von 125 MeV bis 150 MeV, während sie rechts in der Abbildung 400 MeV bis 425 MeV besitzen. Man erkennt, dass für größere Energien, der Winkel zwischen dem generiertem Photon und dem rekonstruiertem Photon kleiner wird.

Dies lässt sich dadurch erklären, dass höher energetische Photonen einen deutlich stärkeren Schauer auslösen, als Photonen mit niedrigerer Energie. Das führte dazu, dass auch der Schauerradius größer wurde. Dadurch wurden mehr Detektorkristalle ausgelöst, wodurch sich der genaue Auftreffort des Photons präziser bestimmen ließ. Folglich nimmt der Winkel zwischen dem generierten und dem entsprechendem gemessenen Photon mit zunehmender Energie ab.

Da nun bekannt ist, dass es einen Winkel zwischen generierten und gemessenen Photonen gibt, wird nun direkt der Öffnungswinkel zwischen den beiden generierten und den beiden gemessenen Photonen verglichen.

Dazu wird die Abweichung der beiden Öffnungswinkel berechnet.

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

$$\Delta\alpha = \alpha_{rec} - \alpha_{gen} \quad (4.3)$$

Dazu wird vom rekonstruiertem Öffnungswinkel α_{rec} der generierte α_{gen} abgezogen. Die Differenz wird dann $\Delta\alpha$ gesetzt. Dieses wird dann für verschiedene Photonenenergien in ein Histogramm aufgetragen.

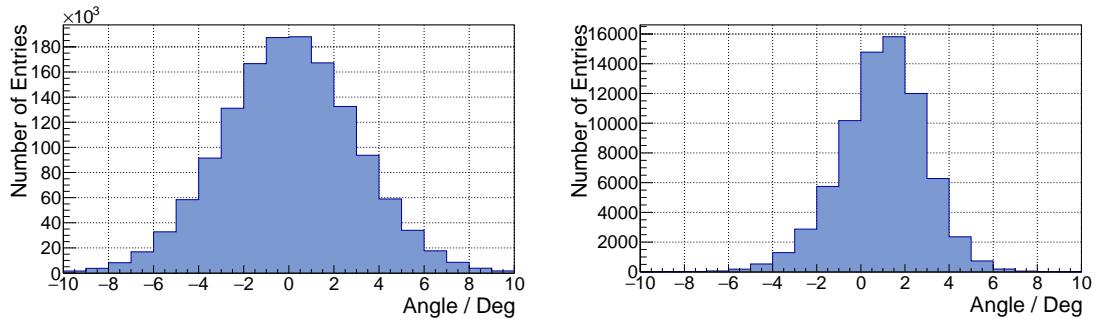


Abbildung 4.11.: Daten aus der Simulation: Aufgetragen ist $\Delta\alpha$. Links liegt die Energie der Photonen zwischen 125 MeV und 150 MeV, rechts zwischen 400 MeV und 425 MeV.

In Abbildung 4.11 ist diese Abweichung für zwei verschiedene Energien zu sehen. Links besitzen die Photonen eine Energie von 125 MeV bis 150 MeV, während sie rechts eine Energie von 400 MeV bis 425 MeV besitzen. Hier erkennt man, dass für kleine Energien die Abweichung der beiden Öffnungswinkel um die Null verteilt ist. Liegt allerdings eine hohe Photonenenergie vor, so verschiebt sich diese Verteilung etwas nach rechts, sodass die häufigste Differenz bei 1° bis 2° liegt. Das bedeutet in der Regel wird ein zu großer Öffnungswinkel für hohe Photonenenergien rekonstruiert. Mit Gleichung 4.1 folgt damit, das eine zu große invariante Masse berechnet wird.

Dieses Phänomen wird nun genauer untersucht.

Dazu wird als erstes bestimmt, welchen Öffnungswinkel α man für verschiedene Photonenenergien erhält, wenn die Bedingung gilt, dass die Energie der Photonen ähnlich sein muss.

Dazu werden die Daten aus dem Ereignisgenerator entnommen.

In Abbildung 4.12 ist zu sehen, wie der Öffnungswinkel α für größer werdende Energien kleiner wird. Aus der Abbildung kann man auch entnehmen, dass für eine Photonenenergie von 400 MeV der Öffnungswinkel nur ca. 20° beträgt.

Jetzt liegt die Vermutung natürlich nahe, dass die durch die Photonen ausgelösten Cluster sich überlagern. Zwar gab es in Abschnitt 4.2.1 keine Verbesserung, dadurch dass ein Mindestwinkel zwischen den detektierten Photonen verlangt wird, aber dennoch soll diese Beziehung weiter untersucht werden.

In der gleichen Abbildung rechts erkennt man, das für Öffnungswinkel unter 20° der Cluster-Algorithmus anfängt, aus mehreren Kandidaten, also Teilchen die im Crystal-Ball detektiert werden, einen zu machen.

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

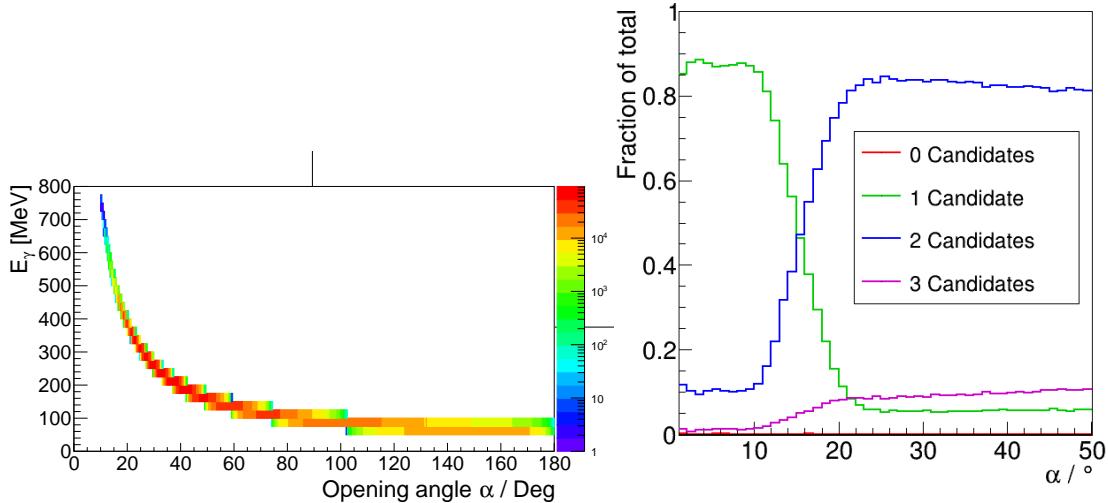


Abbildung 4.12.: Links: Daten aus dem Ereignisgenerator: Öffnungswinkel α für verschiedene Photonenergien; Rechts: Anzahl der gemessenen Kandidaten gegen verschiedene Öffnungswinkel. Rechte Abb.: [Ne17]

Unterhalb von einem Öffnungswinkel von ca. 15° werden schließlich zwei Events in Crystal-Ball häufiger durch den Cluster-Algorithmus zusammengefasst als getrennt.

Wenn die zwei Cluster sich überlagern und durch den Algorithmus zusammengefasst werden, dann lässt sich der Öffnungswinkel zwischen den beiden Teilchen auch nicht eindeutig bestimmen.

4.2.5. Unterschied zwischen generierten und berechneten Öffnungswinkel für verschiedene Z-Vertices

5. Weitere Beobachtungen

Auch hier werden nur Photonen mit einer ähnlichen Energie betrachtet. $|E_{\gamma_1} - E_{\gamma_2}| < 25 \text{ MeV}$

5.1. Dead- und Hot-Crystals

5.1.1. Verhalten von bereits bekannten Dead- und Hot-Crystals

Ein Hot-Crystal ist ein Detektorkristall, der Events registriert, obwohl es kein einfalldendes Teilchen gab. Durch diese Störung der Detektoren, konnten also Teilchen falsch zugeordnet werden, was zu einer falschen berechneten invarianten Masse führte. Ein Dead-Crystal auf der anderen Seite ist ein Kristall, welcher nicht mehr funktioniert und kein Signal mehr von sich gibt.

Betrachtete man sich Abbildung 4.4 links, so entstand bereits hier die Vermutung, dass es mindestens einen Hot-Crystal im Crystal-Ball Detektor gab. Der beste Kandidat war bei einem Azimutwinkel von 160° und einem Polarwinkel von 95° zu finden.

Um nun mehrere dieser Hot-Crystals zu finden, wurde Abbildung 4.4 noch einmal mit einer anderen Photonenergie dargestellt. Auch werden nur Photonen eingetragen, deren berechnete invariante Masse in einem Bereich von 70 MeV bis 220 MeV liegen. Es werden die Daten aus der Strahlzeit genommen.

In Abbildung 5.1 ist die Verteilung der registrierten Teilchen im Crystal-Ball für eine Photonenergie von 0 MeV bis 100 MeV dargestellt. Hier wurden 3 mögliche Kandidaten für Hot-Crystals mit roten Kreisen markiert.

Um sich nun besser orientieren zu können, wurde mit den gleichen Daten eine Karte des Crystal-Balls gefüllt, auf der jeder Detektor dargestellt war.

Anschließend wurde versucht die Position der Hot-Crystals auch auf Crystal-Ball Karte zu finden und zuzuordnen.

Wie in Abbildung 5.2 zu sehen ist, handelte es sich bei den vermuteten Hot-Crystals um Dead-Crystals. Diese waren allerdings von Kristallen umgeben, die deutlich mehr Events registriert haben als erwartet.

Die violett umkreisten Detektoren sind auch tote Kristalle, diese verhalten sich allerdings anders, als die rot eingekreisten, da sie in Abbildung 5.1 nicht auffallen.

Mithilfe der Karte ist es auch möglich die Kristalle die genaue Elementnummer der Kristalle zu bestimmen.

Wenn man sich nun diese Karten mit durch Monte-Carlo generierten Daten anschaut, fällt auf, dass die Nachbarn der toten Kristalle auch bei niedrigen Energien nicht aufleuchten. Sie verhalten sich, wie zu erwarten war. Das heißt, es ist sehr wahrscheinlich, dass die Hardware gestört ist.

5. Weitere Beobachtungen

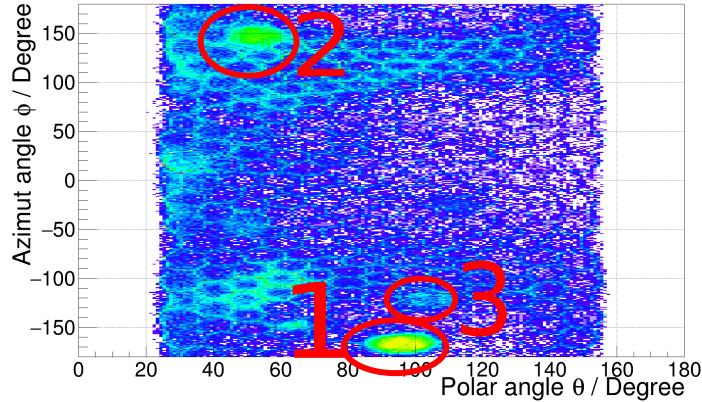


Abbildung 5.1.: Daten aus der Strahlzeit: Verteilung der detektierten Teilchen im Crystal-Ball. Die Energie der Teilchen musste ähnlich sein und lag im Intervall von 0 MeV bis 100 MeV. Markiert sind mögliche Hot-Crystals

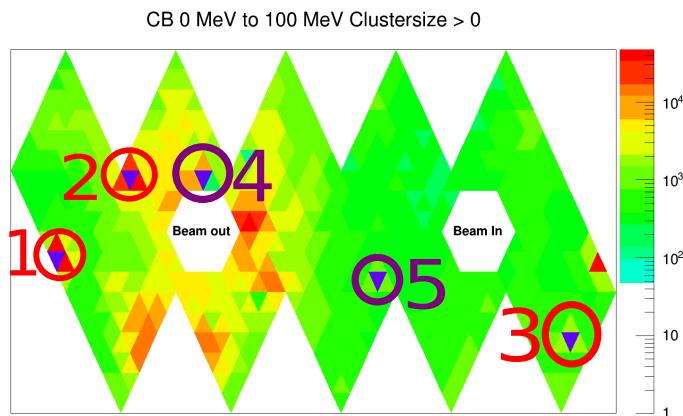


Abbildung 5.2.: Daten aus der Strahlzeit: Crystal-Ball Map für eine Photonenenergie von 0 MeV bis 100 MeV. Makiert sich die gleichen Kristalle, wie in Abbildung 5.1 und in lila zwei weitere tote Kristalle

Die genaue Ursache dieses Phänomens muss allerdings noch bestimmt werden. Für höhere Energien verhalten sich alle Nachbarn von toten Kristallen wie erwartet. Es ist kein aufleuchten mehr zu erkennen. Da diese Störung auch nur für niedrige Energien auftritt, ist sie bei der Betrachtung der Abweichung vom π^0 -Peak für Photonen mit ähnlicher Energie nicht weiter wichtig gewesen, da die starke Abweichung nur für Photonenenergien auftritt, die größer als

5. Weitere Beobachtungen

Nummer in Abb.	Elementnummer	Anzahl der Events
1	549	0
2	565	0
3	597	0
4	677	0
5	265	0

Tabelle 5.1.: Tabelle mit den bereits bekannten Dead-Crystals. An der Anzahl der Events erkennt man auch, dass die Detektoren ausgeschaltet sind.

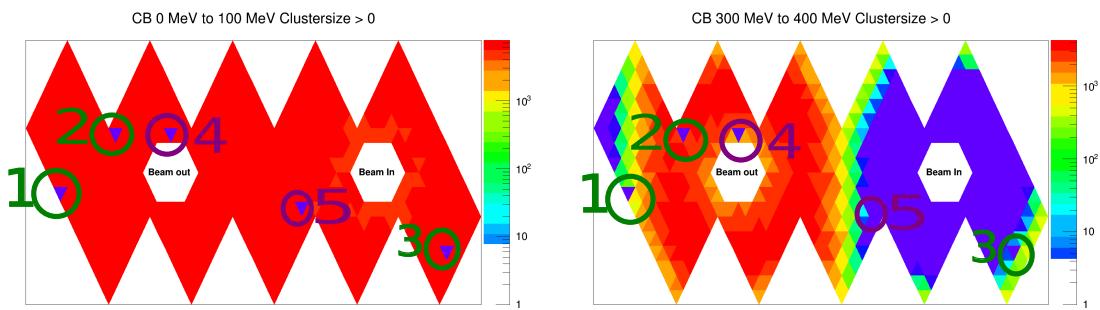


Abbildung 5.3.: Daten aus der Strahlzeit: Es sind die gleichen Kristalle, wie in der vorherigen Abb. markiert. Allerdings sind die Kristalle die vorher rot makiert waren, hier grün makiert, da man sie sonst nicht erkennen kann. Links besitzen die Photonen eine Energie von 0 MeV bis 100 MeV rechts von 300 MeV bis 400 MeV.

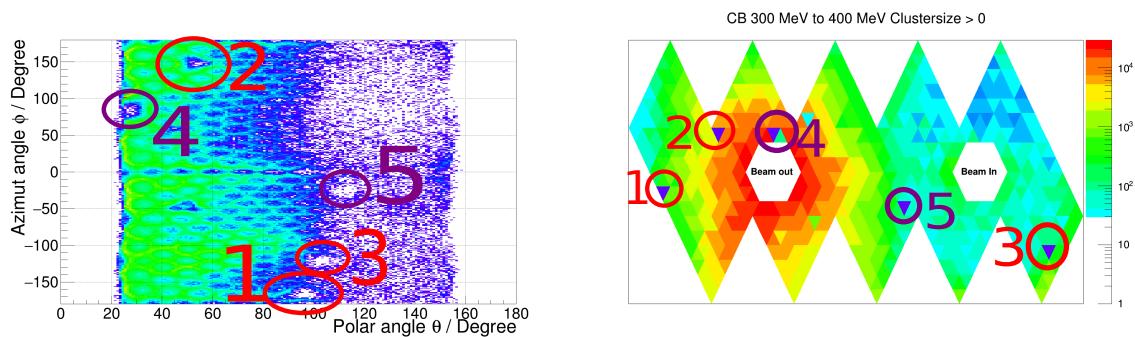


Abbildung 5.4.: Daten aus der Strahlzeit: Es wurden die gleichen Kristalle, wie in der vorherigen Abb. markiert, allerdings ist die Photonenergie hier von 300 MeV bis 400 MeV.

5. Weitere Beobachtungen

300 MeV sind.

Auch wenn man verlangt, dass die Clustersize größer als vier sein muss, das heißt, jedes detektierte Teilchen muss mindestens drei Detektoren auslösen, detektieren die Nachbarn der drei Dead-Crystals immer noch zu viele Events.

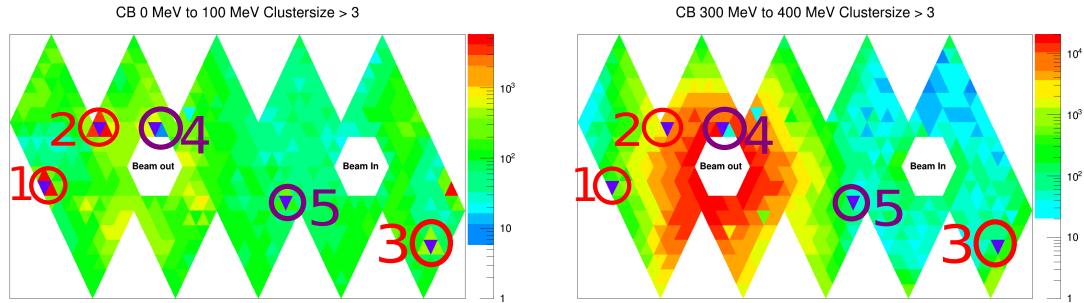


Abbildung 5.5.: Daten aus der Strahlzeit. Makiert sind die bereits bekannten Dead-Crystals. Allerdings gibt es hier die Bedingung, dass mindestens 4 Detektoren bei einem Events ausgelöst werden müssen.

5.1.2. Vermutung für weitere Dead-Crystals

Wie in Kapitel 5.1.1 erwähnt, sind fünf Detektoren bekannt, welche nicht richtig funktioniert haben, und deswegen ausgeschaltet sind. Allerdings fallen, zusätzlich zu diesen fünf Kristallen, noch weitere auf, welche ungewöhnlich wenig Events registrieren.

Die Karte, in der diese Kristalle makiert sind, ist in Abbildung 5.6 zu sehen.

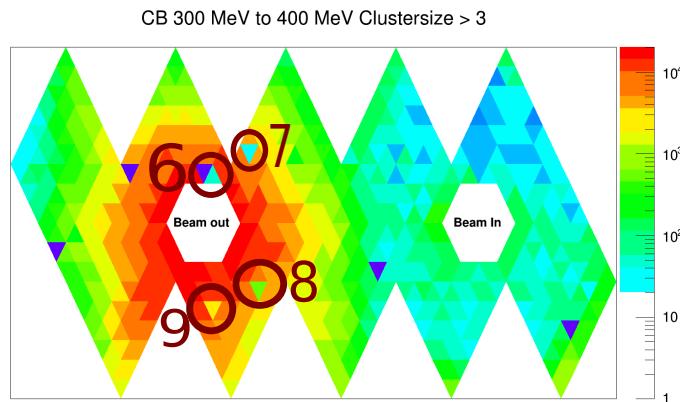


Abbildung 5.6.: Daten aus der Strahlzeit: Makiert sind vermutete Dead-Crystals, die als solche noch nicht markiert wurden

5. Weitere Beobachtungen

Hier sind vier weitere Detektoren zu sehen, die im Vergleich zu ihren Nachbardetektoren weniger Events registriert haben, als man erwarten würde. Der durch die Nummer sechs markierte Kristall liegt direkt neben dem bereits als nicht funktionierenden Kristall markierten Kristall (Nummer in Abb. 4 / Elementnummer 677).

Um nun leichter zu entscheiden, ob es sich bei den Kristallen wirklich um defekte handelt, wird wieder eine Tabelle erstellt.

Nummer in Abb.	Elementnummer	Anzahl der Events
6	678	48
	677	0
	676	11808
7	17	21
	16	3311
	18	7175
	19	3439
8	125	513
	122	6613
	128	5307
	126	4103
9	89	2500
	88	8591
	90	7975
	91	4652

Tabelle 5.2.: Tabellen mit weiteren vermutlichen Dead-Crystals (Rot markiert). Auch eingetragen sind die Anzahl der Events in den Detektoren. Schwarz geschrieben sind die Nachbarn der Detektoren.

In Tabelle 5.2 sind die Detektoren rot aufgetragen, die vermutlich ebenfalls nicht wie gewünscht funktionieren. Ihre jeweiligen Nachbarn sind schwarz geschrieben dargestellt. Die Vermutung, dass diese Detektoren defekt sind, entstand dadurch, dass sie teilweise deutlich weniger Events registrieren als ihre Nachbarn. Der Nachbar mit der Elementnummer 677 stellt dabei eine Ausnahme dar, da dieser, wie in Kapitel 5.1.1 bereits beschrieben, ein bekannter toter Kristall ist und damit ausgeschalten ist. Der Kristall 678 registriert allerdings nur 48 Events, während einer seiner Nachbar, welche nicht als Hot-Crystal identifiziert wurde, über 10000 Events detektiert. Bei einer so großen Abweichung muss man davon ausgehen, dass Kristall 678 nicht richtig funktioniert.

Ähnlich ist es auch bei den anderen Vermutungen. Zwar ist der Unterschied hier nicht so groß, allerdings ist er immer noch sehr deutlich, sodass man diese Kristalle auch genauer untersuchen sollte.

5. Weitere Beobachtungen

5.2. ϕ -Verteilung im Crystal-Ball

Auch ist die Verteilung, welche die Photonen im Crystal-Ball haben, sehr ungewöhnlich.

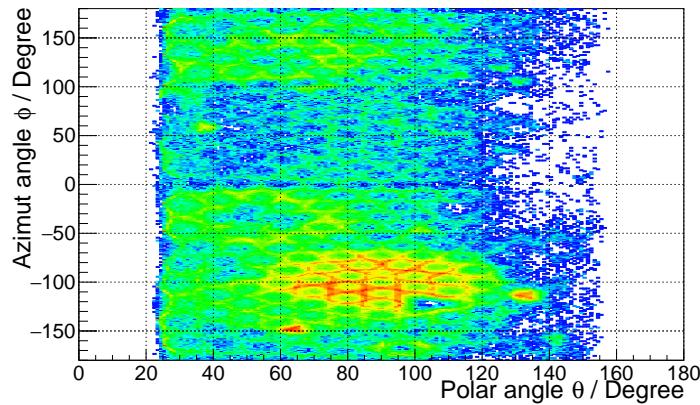


Abbildung 5.7.: Daten aus der Strahlzeit: Es handelt sich um Photonen mit einer Energie zwischen 200 MeV und 225 MeV. Es ist die Verteilung der detektierten Photonen im Crystal-Ball dargestellt. Es wurde über alle von einem Photon ausgelösten Photonen gemittelt, um den genauen Aufftrefort zu bestimmen.

Zu sehen ist diese Verteilung in Abbildung 5.7. Eigentlich würde man erwarten, dass sich die Photonen unabhängig vom ϕ -Winkel im Raum verteilen. Das liegt daran, dass der eingehende Photonenstrahl in z -Richtung verläuft, und damit werden alle anschließend entstehenden Teilchen in z -Richtung geboostet. Folglich sind sie unabhängig von ϕ . Allerdings sieht man in dieser Abbildung, dass die meisten Teilchen in der unteren Hälfte des Crystal-Balls bei einem ϕ Winkel von ca. -100° detektiert werden.

Dass es sich hierbei um Hot-Crystals handelt, ist sehr unwahrscheinlich, da sehr viele Crystalle betroffen sind.

Auch hierfür muss die genaue Ursache noch herausgefunden werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

A. Anhang

A.1. Herleitung der Formel zur Berechnung der invarianten Masse

Man betrachte die drei Viererimpulse für den Prozess: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

$$p_{\pi^0}^\mu = \begin{pmatrix} E_{\pi^0} \\ \vec{p}_{\pi^0} \end{pmatrix}, p_1^\mu = \begin{pmatrix} E_1 \\ \vec{p}_1 \end{pmatrix} \text{ und } p_2^\mu = \begin{pmatrix} E_2 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Dabei sind E_1 und E_2 die Energien und \vec{p}_1 und \vec{p}_2 die Impulse der beiden Photonen und E_{π^0} die Energie und \vec{p}_{π^0} der Impuls des Pion.

Aufgrund der Energie- und Impulserhaltung gilt:

$$p_{\pi^0}^\mu = p_1^\mu + p_2^\mu \quad (\text{A.2})$$

Diese Gleichung kann nun quadriert werden:

$$\begin{aligned} \rightarrow \underbrace{p_{\pi^0}^{\mu^2}}_{m_{\pi^0}^2} &= (p_1^\mu + p_2^\mu)^2 \\ \rightarrow m_{\pi^0}^2 &= \underbrace{p_1^{\mu^2}}_{=m_1^2} + \underbrace{p_2^{\mu^2}}_{=m_2^2} - 2p_1^\mu p_2^\mu \\ &= m_1^2 + m_2^2 - 2E_1 E_2 + 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 - 2E_1 E_2 + 2|\vec{p}_1||\vec{p}_2|\cos(\alpha) \\ &\text{mit } \alpha = \angle(\vec{p}_1, \vec{p}_2) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Da man sich nur für die Photonen interessiert, kann angenommen werden, dass es sich bei den Teilchen um Photonen handelt. Daraus folgt das $|\vec{p}_1| = E_1$ und $|\vec{p}_2| = E_2$ und $m_1 = m_2 = 0$ gilt.

Damit lässt sich die invariante Masse des Pions, welches in die beiden Photonen zerfallen ist, durch

$$\Rightarrow m_{\pi^0} = \sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos(\alpha))} \quad (\text{A.4})$$

berechnen.

Durch den Crystal-Ball sind alle Variablen in dieser Gleichung bekannt. So kann die Energie der Photonen bestimmt werden und durch Kenntnis des Auftreffortes der Photonen im Crystal-Ball kann der Winkel zwischen den beiden Photonen errechnet werden. Dazu muss allerdings angenommen werden, dass das π^0 im Zentrum des Targets zerfällt. Siehe dazu Kapitel 4.2.3.

A. Anhang

A.2. Abbildungen

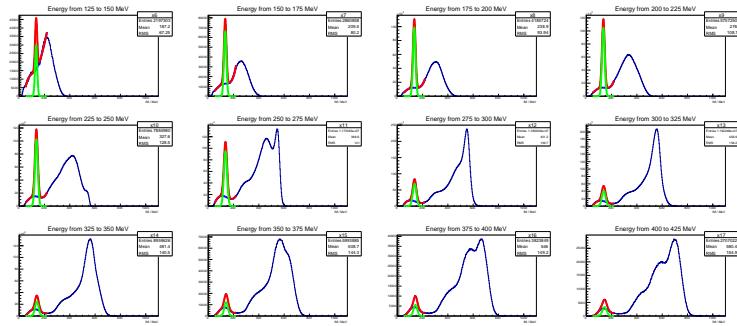


Abbildung A.1.: Alle Fits der Energieintervalle mit der Bedingung, dass sich die Photonen sich energetisch ähneln.

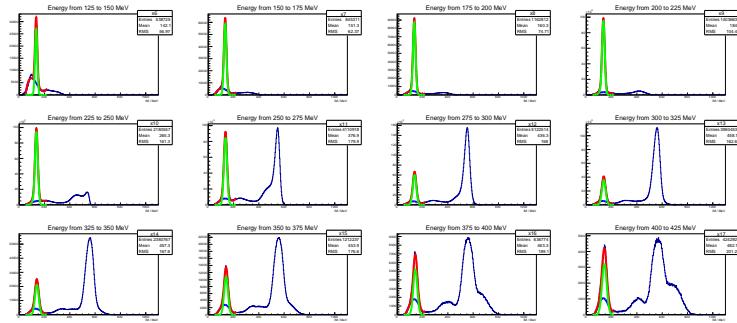


Abbildung A.2.: Alle Fits der Energieintervalle mit der Bedingung, dass sich die Photonen sich energetisch ähneln und dass die detektierten Teilchen ungeladen sind.

A. Anhang

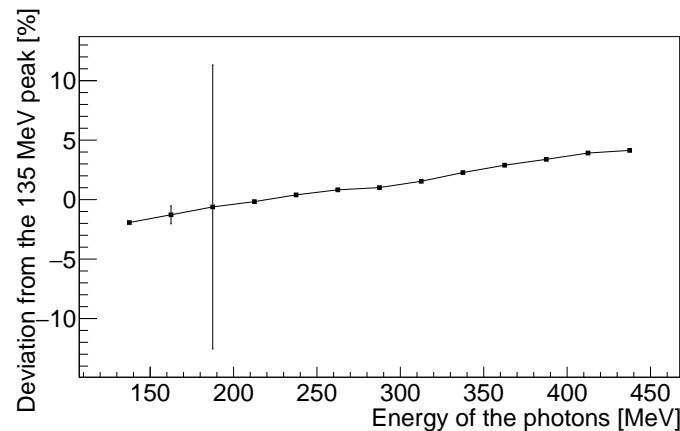


Abbildung A.3.: Daten aus der Strahlzeit: Unzoomed Abweichung

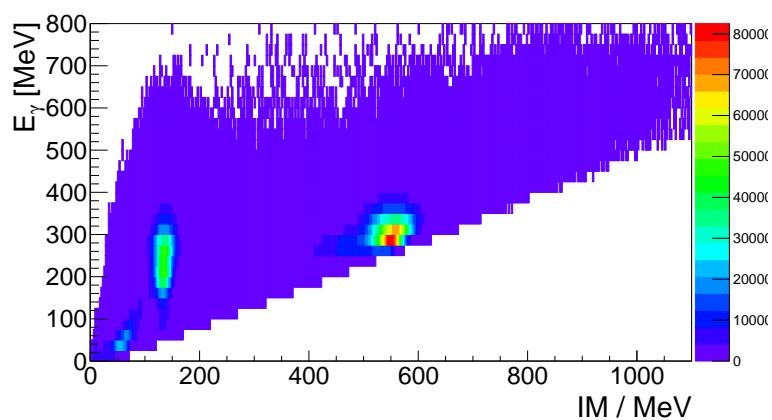


Abbildung A.4.: Das Histogramm das gefüllt wurde mit der Bedingung, dass sich die Energie der Photonen ähneln muss und dass die Detektoren am Rand vernachlässigt wurden.

A. Anhang

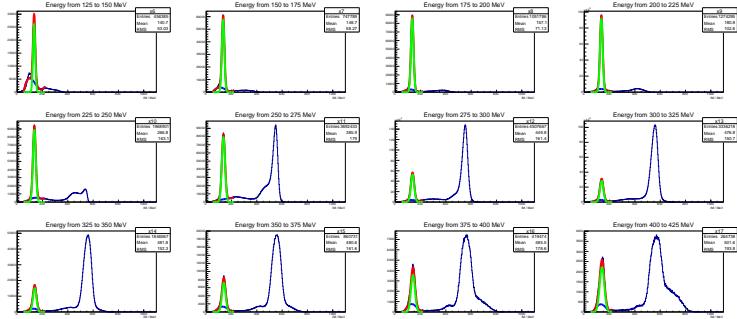


Abbildung A.5.: Alle Fits der Energieintervalle mit den Bedingungen, dass sich die Photonen sich energetisch ähneln und dass die detektierten Teilchen ungeladen sind. Außerdem wurden die Detektoren am Rand vernachlässigt.

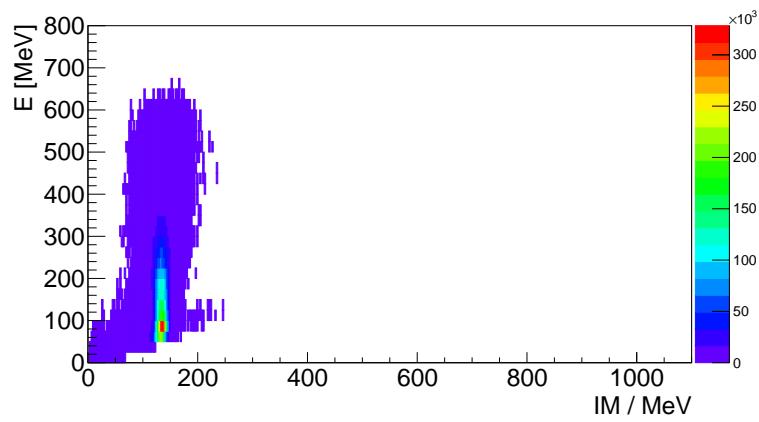


Abbildung A.6.: Zweidimensionales Histogramm mit Simulierten Daten. Die Energie der detektierten Photonen musste ähnlich sein, außerdem wurden die Detektoren am Rand nicht berücksichtigt.

A. Anhang

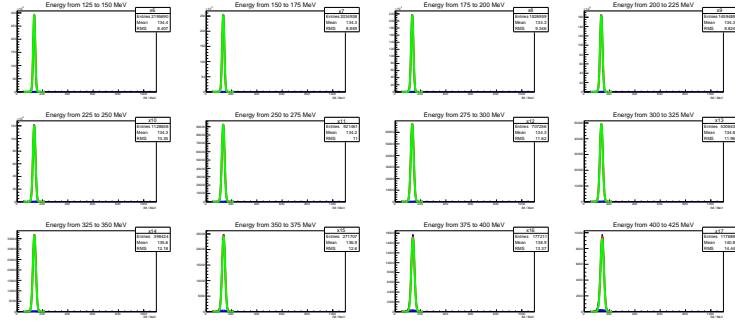


Abbildung A.7.: Alle Fits zu den Simulierten Daten mit der Bedingung, dass die Photonen eine ähnliche Energie besitzen müssen.

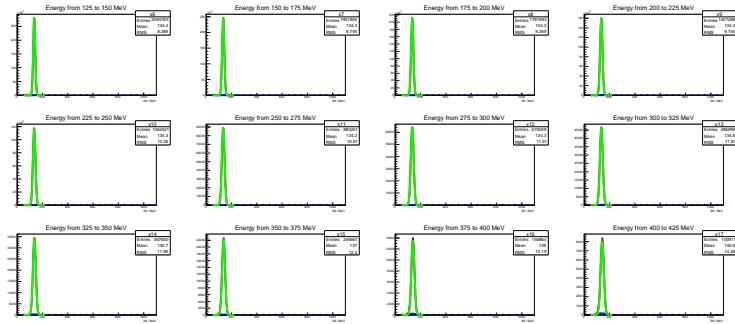


Abbildung A.8.: Alle Fits zu den Simulierten Daten mit der Bedingung, dass die Photonen eine ähnliche Energie besitzen müssen. Außerdem werden die Detektoren am Rand berücksichtigt.

A. Anhang

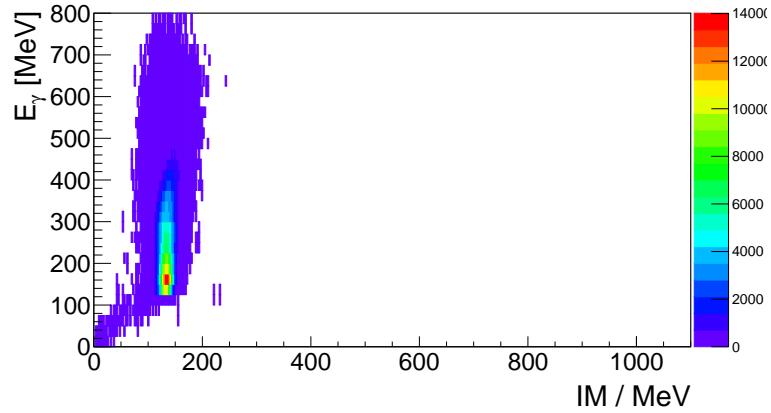


Abbildung A.9.: Zweidimensionales Histogramm mit Simulierten Daten. Die Pionen sind Isotrop im Ursprung zerfallen und erhielten einen Boost in eine zufällig bestimmte Richtung. Die Energie der detektierten Photonen musste ähnlich sein.

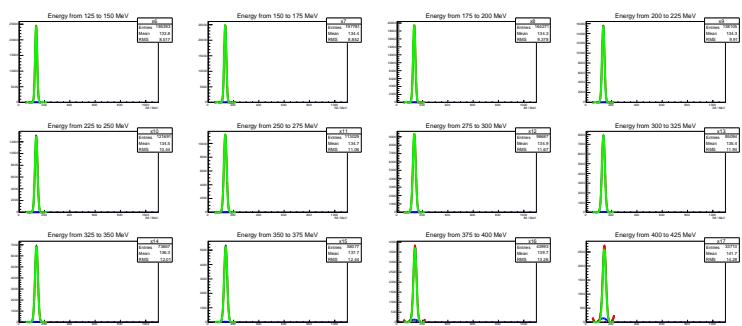


Abbildung A.10.: Alle Fits mit der Bedingung, dass das π^0 im Ursprung zerfällt, und in eine zufällige Richtung geboostet wird.

A. Anhang

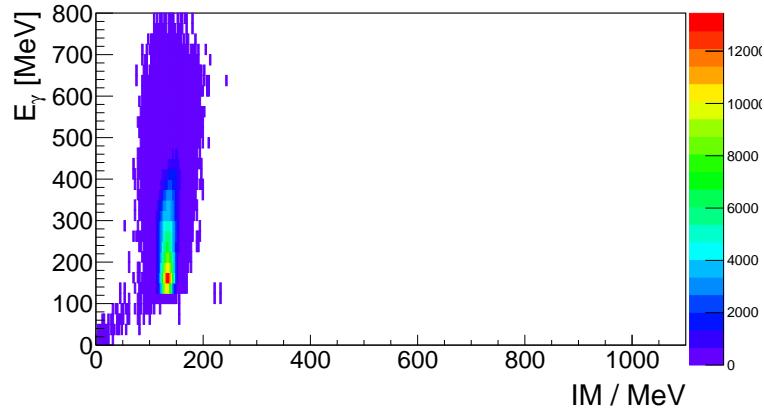


Abbildung A.11.: Zweidimensionales Histogramm mit Simulierten Daten. Die Pionen sind Isotrop im Ursprung zerfallen und erhielten einen Boost in eine zufällig bestimmte Richtung. Die Energie der detektierten Photonen musste ähnlich sein, außerdem wurden die Detektoren am Rand nicht berücksichtigt.

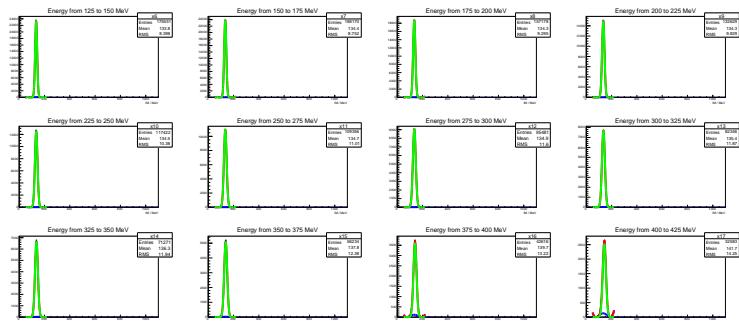


Abbildung A.12.: Alle Fits mit der Bedingung, dass das π^0 im Ursprung zerfällt, und in eine zufällige Richtung geboostet wird. Die Detektoren am Rand wurden nicht berücksichtigt.

A. Anhang

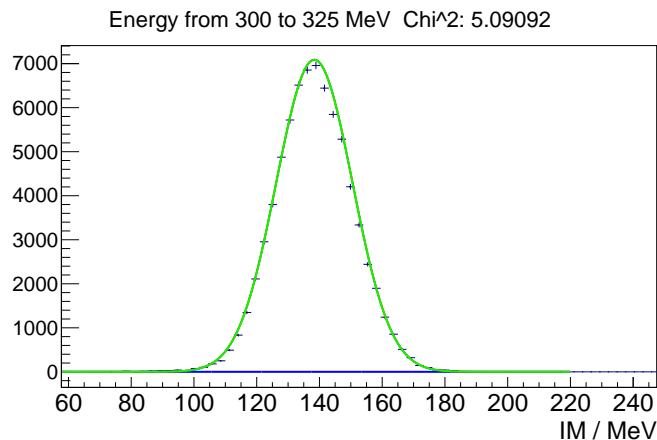


Abbildung A.13.: Daten aus der Simulation: 'Fehlgeschlagener' Fit für Isotroper Zerfall im Ursprung.

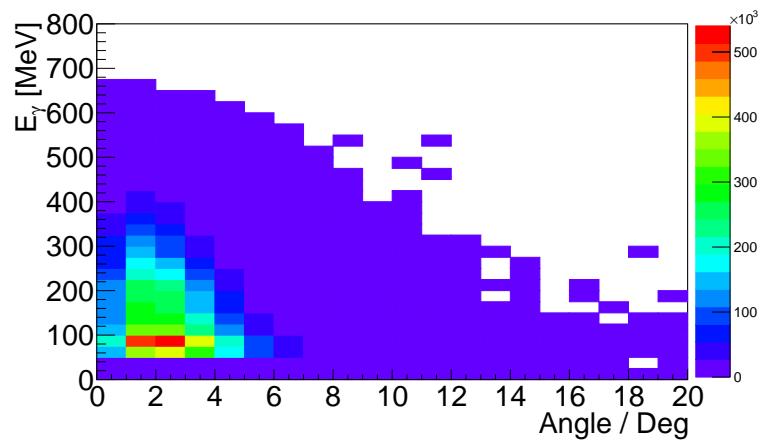


Abbildung A.14.: Daten aus der Simulation: Zu sehen ist der Winkel zwischen dem generiertem und dem entsprechendem rekonstruiertem Photon für verschiedene Energien.

A. Anhang

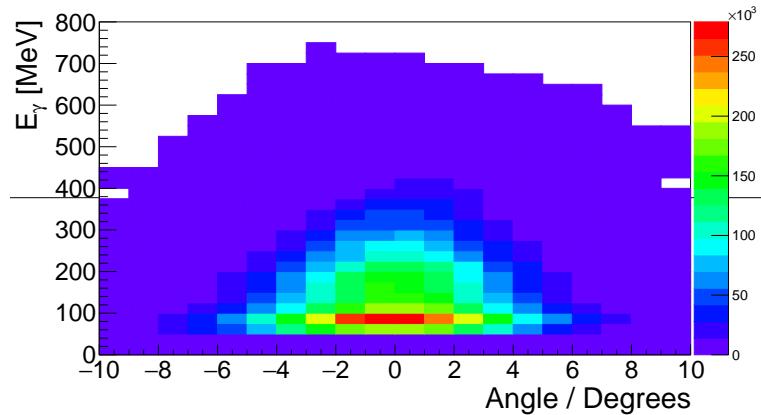


Abbildung A.15.: Daten aus der Simulation: Zu sehen ist der Unterschied zwischen dem tatsächlichen und dem errechneten Öffnungswinkel für verschiedene Photonenergien.

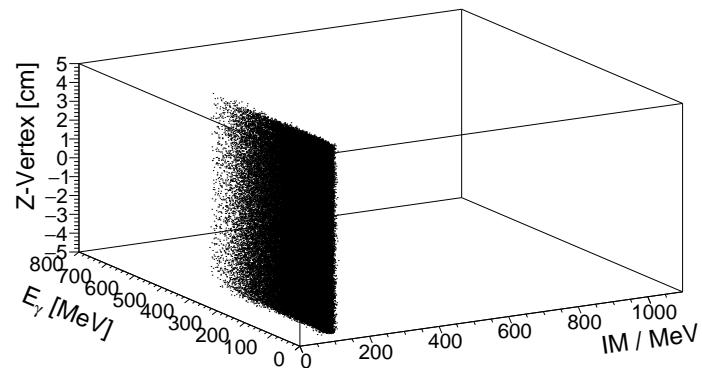


Abbildung A.16.: Darstellung der Abhängigkeit der errechneten π^0 -Masse (x-Achse) von der Energie der detektierten Photonen (y-Achse) und dem Ort an dem das π^0 im Target zerfallen ist (z-Achse). Leider war es nicht möglich dieses Histogramm besser dazustellen.

A. Anhang

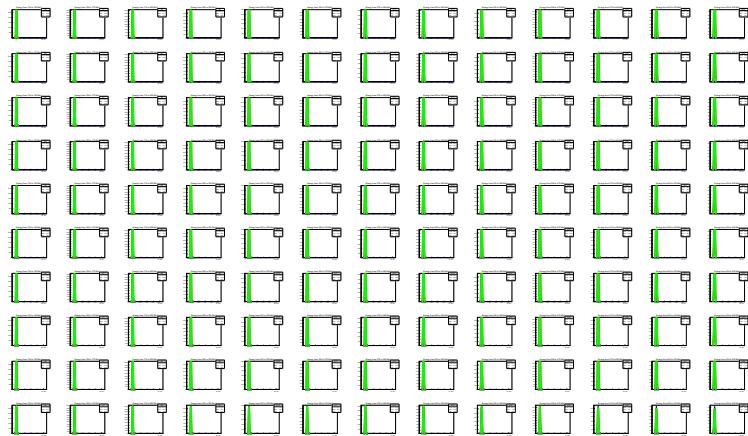


Abbildung A.17.: Alle Fits für die Betrachtung der Z-Vertex Abhängigkeit. In jeder Zeile ist ein einzelnes Z-Vertex-Intervall aufgetragen. Die Detektoren am Rand wurden berücksichtigt

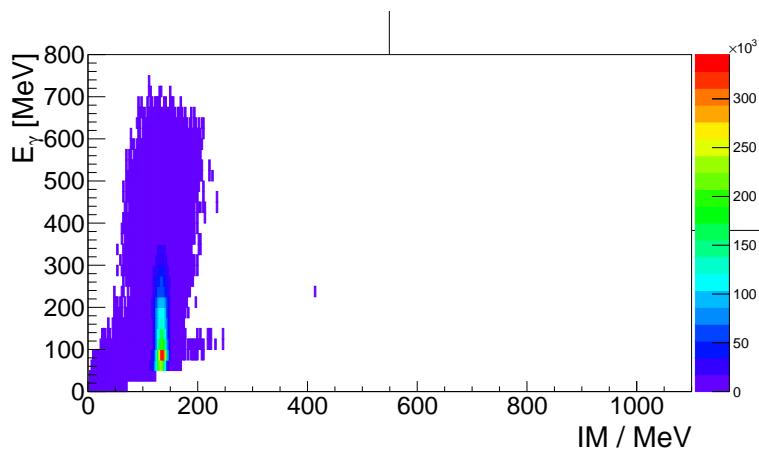


Abbildung A.18.: Histogramm mit der Bedingung, dass der Öffnungswinkel zwischen den beiden detektierten Photonen mindestens 30° beträgt.

A. Anhang

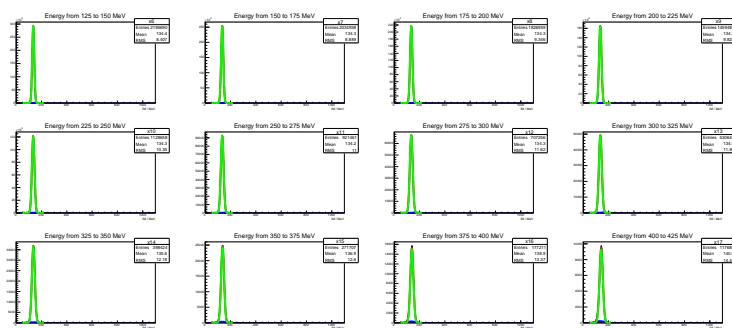


Abbildung A.19.: Alle Fits für die Bedingung, dass der Öffnungswinkel zwischen den detektierten Teilchen mindestens 30° beträgt.

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Grundriss der MAMI-Anlage	4
2.2.	Prinzip eines RTM	5
2.3.	Prinzip des Glasgow-Mainz-Taggers	7
2.4.	Anordnung des Detektorsystems	8
2.5.	Clusterbildung	11
3.1.	Strahlzeit: Beispelfit für die Crystal-Ball-Fitfunktion	14
3.2.	Strahlzeit: Beispiel eines Fits mit reduziertem Untergrund	15
3.3.	Beispiel für die Verteilung durch Zufallsgeneratoren	17
3.4.	Simulation: Vergleich der Ereignisgeneratoren	18
3.5.	Simulation: Direkte Berechnung der π^0 -Masse aus dem neuen Ereignisgenerator	19
4.1.	Strahlzeit: 2D-Histogramm; Symmetrische Photonen	21
4.2.	Strahlzeit: Symmetrische Photonen; Abweichung	22
4.3.	Strahlzeit: Symmetrische Photonen; Vernachlässigung der Detektoren am Rand; Abweichung	23
4.4.	Strahlzeit: Verteilung der symmetrischen Photonen im CB für verschiedene Energien	25
4.5.	Simulation: 2D-Histogramm und Abweichung für symmetrische Photonen	26
4.6.	Simulation: Symmetrische Photonen; Mindestwinkel zwischen detektierten Photonen	27
4.7.	Simulation: Symmetrische Photonen Verteilung der Mesonen und detektierten Photonen im CB bei isotropen Zerfall	28
4.8.	Simulation: Isotroper Zerfall Abweichung mit und ohne Detektoren am Rand	29
4.9.	Simulation: Symmetrische Photonen; Abweichung für verschiedene Z-Vertices	30
4.10.	Simulation: Winkel zw. Gen. und Rec. Photonen	32
4.11.	Simulation: Unterschied zwischen generiertem und rekonstruiertem Öffnungswinkel	33
4.12.	Ereignisgenerator: Öffnungswinkel vs. Photonenergie; Clusteralgorithmus für verschiedene Öffnungswinkel	34
5.1.	Strahlzeit: Markierte 'Hot-Crystals'; Niedrige Energien	36
5.2.	Strahlzeit: Markierte Dead-Crystals auf der CB-Karte; Niedrige Energien	36
5.3.	Simulation: Markierte Dead-Crystals	37

Abbildungsverzeichnis

5.4. Strahlzeit: Markierte Dead-Crystals; Hohe Energien	37
5.5. Strahlzeit: Symmetrische Photonen; Markierte Dead-Crystals; Cluster-size > 3	38
5.6. Strahlzeit: Vermutliche Dead-Crystals	38
5.7. Strahlzeit: Verteilung der detektierten Photonen im CB	40
A.1. Strahlzeit: Symmetrische Photonen alle Fits mit Hintergrund	43
A.2. Strahlzeit: Alle Fits keine weiteren Bedingungen	43
A.3. Strahlzeit: Unzoomed Abweichung	44
A.4. Strahlzeit: 2D-Hist ohne Detektoren am Rand	44
A.5. Strahlzeit: 2D-Hist ohne Detektoren am Rand; alle Fits	45
A.6. Simulation: 2D-Hist; Ohne Detektoren am Rand	45
A.7. Simulation: Alle Fits; Keine weiteren Bedingungen	46
A.8. Simulation: Alle Fits ohne Detektoren am Rand	46
A.9. Simulation: 2D-Hist Isotroper Boost im Ursprung	47
A.10. Simulation: Isotroper Boost im Ursprung alle Fits	47
A.11. Simulation: 2D-Hist Isotroper Boost im Ursprung ohne Detektoren am Rand	48
A.12. Simulation: 2D-Hist Isotroper Boost im Ursprung ohne Detektoren am Rand alle Fits	48
A.13. Fehlgeschlagener Fit Isotrop Ursprung	49
A.14. Simulation: Winkel zwischen generiertem und rekonstruiertem Photon	49
A.15. Simulation: Unterschied zwischen dem rekonstruierten und den errechneten Öffnungswinkel	50
A.16. Simulation: 3D-Hist Z-Vertex	50
A.17. Simulation: Z-Vertex alle Fits	51
A.18. Simulation: 2D-Hist Öffnungswinkel > 30°	51
A.19. Simulation: Öffnungswinkel > 30° alle Fits	52

Tabellenverzeichnis

2.1. Technische Daten der Mamibeschleunigerstufen	6
5.1. Bereits bekannte Dead-Crystals	37
5.2. Vermutete Dead-Crystals und ihre Nachbarn mit Anzahl ihrer Events	39

Literaturverzeichnis

- [Un04] Diplomarbeit von Marc Unverzagt, 2004 *Energie-Eichung des Crystal-Ball-Detektors am MAMI*
- [Un08] Dissertation von Marc Unverzagt, 2008 *Bestimmung des Damitz-Plot-Parameters α für den Zerfall $\eta \rightarrow 3\pi^0$ mit dem Crystal Ball am MAMI*
- [We13] Diplomarbeit von Jennifer Wettig, 2013 *Aufbau und Inbetriebnahme einer neuen HV-Versorgung für den Crystal Ball Detektor am MAMI*
- [Ca10] Dissertatoin von Luigi Capozza, 2010 *Untergrundstudien zur Messung der Strangeness-Vektorformfaktoren des Protons durch paritätsverletzende Elektronenstreuung unter Rückwärtswinkeln*
- [Ne17] Andreas Neiser, Doktorant der A2-Kollaboration.
- [Leo87] William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer, 1987
- [KPh11G] Internetseite der Kernphysik *Mainzer Mikrotron-Geschichte*, Internetseite <http://www.kernphysik.uni-mainz.de/379.php>, (Stand 04.03.2017)
- [KPh11F] Internetseite der Kernphysik *Funktionsprinzip des MAMI*, Internetseite <http://www.kernphysik.uni-mainz.de/375.php>, (Stand 06.03.2017)
- [KPh11B] Internetseite der Kernphysik *Betrieb*, Internetseite <http://www.kernphysik.uni-mainz.de/377.php>, (Stand 26.04.2017)
- [KPh04] Prospekt des Institut für Kernphysik Internetlink, <https://portal.kph.uni-mainz.de/de/information/introduction/prospekt.pdf>, (Stand: 04.03.2017)
- [KPh07] Pressemitteilung der KPh, https://www.uni-mainz.de/presse/archiv/zope.verwaltung.uni-mainz.de/presse/mitteilung/2007/2007_10_05_phys_einweihung_mami/showArticle_dtml.html, (Stand 06.03.2017)
- [KPh16] Internetseite der A2-Kollaboration *Reelle Photonen* Internetseite <http://www.kph.uni-mainz.de/a2.php> (Stand 11.03.2017)
- [PDG16] Internetseite der PDG *Particle Data Group* <http://pdg.lbl.gov/>, (Stand 20.03.2017)
- [De15] Skript & Übungsblätter zur Vorlesung Experimentalphysik Vb WS15/16 Johannes-Gutenberg Universität Mainz, Prof. Denig https://reader.uni-mainz.de/WiSe2015-16/08-128-055-00/_layouts/15/start.aspx#/Lists/DocumentLib/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=, (Stand: 14.03.2017)

Literaturverzeichnis

- [Ce15] Hilfeseite für die Crsystal-Ball Funktion in Root <https://root.cern.ch/root/html/tutorials/math/CrystalBall.C.html> (Stand: 27.04.2017)
- [NBI15] Einführung in die Programmierung mit Root von Manuel Calderon de la Barca Sanchez http://www.nbi.dk/~petersen/Teaching/Stat2015/PythonRootIntro/ROOT_TipsAndTricks.pdf (Stand: 27.03.2017)
- [Ce17] Hilfeseite für Zufallsgeneratoren in Root <https://root.cern.ch/doc/master/classTRandom.html#a2007ae15ce828266aecb783ed3410e8b> (Stand: 11.04.2017)