

# **Systematische Studien zur $\pi^0$ Kalibrierung des Crystal-Ball Detektor**

von

**Martin Sobotzik**

Bachelorarbeit in Physik rtm/  
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  
KOMET  
Institut für Physik  
Staudingerweg 7  
Johannes Gutenberg-Universität D-55099 Mainz  
`msobotzi@students.uni-mainz.de`

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivaton . . . . .	1
1.2. Gliederung . . . . .	2
<b>2. Experimenteller Aufbau am MAMI</b>	<b>3</b>
2.1. Der MAMI-Beschleuniger . . . . .	3
2.2. Die Photonenmarkierungsanlage . . . . .	6
2.3. Das Detektorsystem . . . . .	6
2.3.1. Der Crystal-Ball-Detektor . . . . .	7
2.3.2. TAPS, PID & MWPC . . . . .	9
<b>3. Herleitung der Formel zur Berechnung der invarianten Masse</b>	<b>10</b>
<b>4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball</b>	<b>11</b>
4.1. Energie-Interval Abhängigkeit . . . . .	11
4.2. Vernachlässigung der Detektoren am Rand . . . . .	14
4.3. Z-Vertex Abhängigkeit . . . . .	16
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>19</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>20</b>
A.1. Tabellen und Abbildungen . . . . .	20
A.2. Weiterführende Details zur Arbeit . . . . .	20
<b>B. Danksagung</b>	<b>26</b>

# 1. Einleitung

In der folgenden Arbeit werden natürliche Einheiten verwendet, d.h.  $\hbar = c = 1$ .

## 1.1. Motivaton

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 untersuchte 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 bestand aus 672 Natriumiodid Kristallen die als Detektoren dienten und deckte ca. 94% des Raumwinkels ab. Er hatte zwei Bereiche ohne Detektor die für den Strahlenein- und -ausgang vorheriger Experimente dienten. Um die Detektoren nun zu kalibrieren, betrachtete man folgende Prozesse:

$$\gamma + p \rightarrow p + \pi^0 \quad (1.1)$$

Bei diesem Prozess absorbiert ein Proton  $p$  ein hochenergetischen Photon  $\gamma$ . Dabei wird ein  $\pi^0$ -Meson erzeugt.

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad (1.2)$$

Das  $\pi^0$ -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 Wahrscheinlichkeiten von unter  $10^{-5}\%$  aufweisen. Im Crystal-Ball wurde, sowohl die Energie der Photonen, als auch ihr Winkel in Strahlrichtung bestimmt, woraus sich die invariante Masse des  $\pi^0$  berechnen lies. Laut Literatur beträgt diese Masse 135 MeV [PDG16], folglich wurden die Detektoren so eingestellt, dass sich der errechnete  $\pi^0$ -Peak bei dieser Masse befand.

Eine Problematik ergab sich allerdings dadurch, dass zum Beispiel, ein Photon nicht seine gesamte Energie an einen Detektorkristall überträgt, sondern auch an die umliegenden. Nun hat aber nicht jeder Detektor gleich viele Nachbarn. Die Detektoren am Rand des Strahlenein- und ausgangs haben weniger Nachbarn, als die restlichen Detektoren. Folglich konnten sie nicht sehr gut kalibriert werden, da die Energie des Photons, welches diese Detektoren traf nicht vollständig bekannt war.

Dieses und noch weitere Probleme wurden in dieser Bachelorarbeit untersucht.

*1. Einleitung*

**1.2. Gliederung**

## 2. Experimenteller Aufbau am MAMI

Der Mainzer Mikrotron (MAMI) war zur Zeit meiner Bachelorarbeit ein mehrstufiger Rennbahn-Teilchenbeschleuniger (RTM<sup>1</sup>) für Elektronenstrahlen und stand verschiedenen Arbeitsgruppen für Experimente zur Verfügung. Die Anlage befand sich auf dem Gelände des Instituts für Kernphysik (KPh) der Johannes Gutenberg-Universität und bestand aus mehreren Hallen.

Die A2-Kollaboration untersuchte vor allem die Struktur von Nukleonen mit Hilfe von reellen Photonen, welche durch Bremsstrahlung des MAMI-Elektronenstrahls erzeugt wurden. Die Photonenenergie konnte durch eine Photonenmarkierungsanlage (Tagger<sup>2</sup>) bestimmt werden. Nach der Reaktion mit dem Target wurden 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 Elektronenenergie von 14 MeV erreicht werden konnte. Im Laufe der Jahre wurde das MAMI um zwei weitere RTMs und einem HDSM<sup>3</sup> erweitert, wodurch eine Elektronenenergie von 1,5 GeV erreicht werden konnte.[KPh11G]

Um unpolarisierte Elektronen zu erzeugen, wurde eine Glühkathode auf 1000°C erhitzt. Dadurch konnten Elektronen den Heizdraht, aufgrund ihrer thermischen Bewegung, verlassen. Diese Elektronen wurden dann durch ein elektrisches Feld, welches durch die heiße Kathode und einer Anode, erzeugt wurde, zur Anode beschleunigt und traten dann durch ein Loch in der Anode aus und wurden 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 machte es zu einem Dauerstrich-Elektronen-Beschleuniger. Das heißt die Frequenz, mit der die Elektronen-Pakete auftraten, war größer, als die Frequenz, mit der die Detektoren einzelne Events auflösen konnten und somit wirkte der Strahl für die Detektoren kontinuierlich. Am MAMI war es auch möglich einen spinpolarisierten Elektronenstrahl zu erzeugen, dazu wurde ein GaAs Kristall mit polarisiertem Laserlicht bestrahlt. Für die Experimente der A2-Kollaboration war ein unpolarisierter Strahl ausreichend.

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

---

<sup>1</sup>Race-Track-Microtron

<sup>2</sup>to tag = markieren

<sup>3</sup>Harmonic Double Sided Microtron

## 2. Experimenteller Aufbau am MAMI

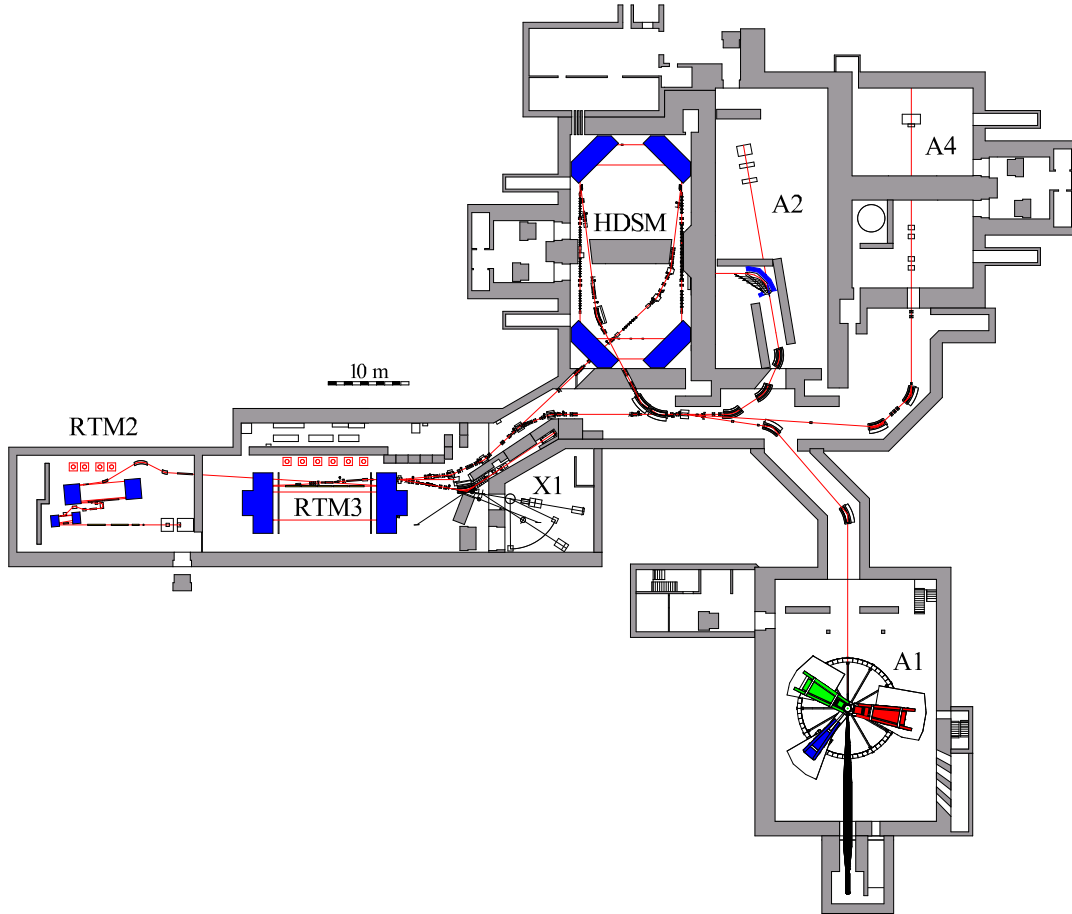


Abbildung 2.1.: Grundriss der Beschleunigeranlage MAMI. Zu sehen sind die drei RTMs, der HDSM der Tagger und die verschiedenen Experimentierhallen: A1 (Elektronenstreuung), A2 (Strukturanalyse von Nukleonen), A4 (Paritätsverletzung) und X1 (Röntgenstrahlung). [KPh07]

man sich dafür, die Elektronen mehrmals durch den gleichen Beschleunigerabschnitt zu beschleunigen. Dazu wurden sie nachdem sie beschleunigt wurden, durch zwei  $180^\circ$  Dipole so umgeleitet, dass sie wieder am Anfang des Beschleunigerabschnitts waren und diese Bahn abermals durchlaufen konnten. Nun besaßen die Elektronen mehr Energie und wurden in einer Bahn mit größerem Radius durch die Dipole geleitet bis die gewünschte Energie erreicht wurde und der Strahl in den nächsten Abschnitt umgeleitet wurde. Die Struktur eines RTM erinnerte an eine antike Pferderennbahn, daher hat der RTM seinen Namen.

Eine phasengerichtete Rückkopplung ist allerdings nur möglich, wenn die statische und die dynamische Kohärenzbedingung erfüllt sind. Damit die statische Kohärenzbedingung erfüllt ist, muss die Länge der ersten vollständigen Bahn ein ganzzahliges Vielfaches der beschleunigten Hochfrequenz sein. Für die dynamische Kohärenzbedin-

## 2. Experimenteller Aufbau am MAMI

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

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

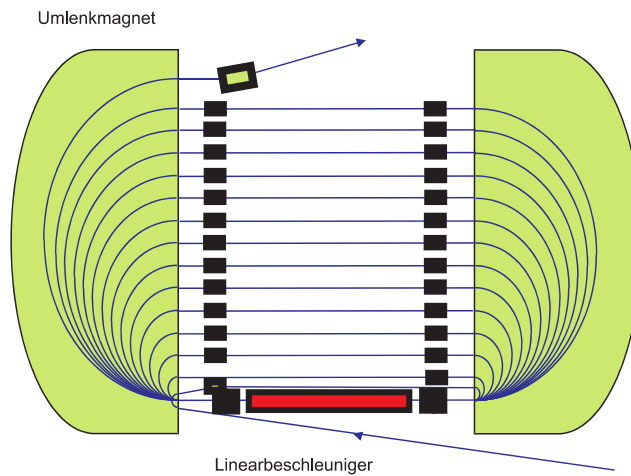


Abbildung 2.2.: Prinzip eines RTM: Der Elektronenstrahl wird immer wieder durch den Linearbeschleuniger geschickt, bis die gewünschte Energie erreicht wurde und der Strahl mittels eines sogenannten Kicker-Magnet zum nächsten Abschnitt weiter geleitet wird.[KPh07]

Um nun aber trotzdem höhere Energien zu erreichen, musste sich ein neues Konzept überlegt werden. MAMI C war folglich kein RTM mehr, sondern ein HDSM. Das heißt, es bestand aus vier 90° Dipolen, welche jeweils 250 t schwer waren und einem zusätzlichen Linearbeschleuniger. Dieses HDSM wurde der erste Linearbeschleuniger der Welt gebaut, der mit einer Frequenz von 4,9 GHz betrieben werden konnte. Er wurde allerdings, wie die beiden vorherigen RTMs mit einer Frequenz von 2,45 GHz.

Der Elektronenstrahl hatte am Ende der Beschleunigung eine Energie von ca. 1,5 GeV, diese konnte in etwa 15 MeV Schritten eingestellt werden. Sein Durchmesser lag im Mikrometerbereich, was sehr gute Voraussetzungen für Präzisionsexperimente waren.[KPh07].



## 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	1,5 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]

### 2.2. Die Photonenmarkierungsanlage

In der A2-Experimentierhalle wurde der reelle Photonenstrahl mittels Bremsstrahlung erzeugt. Dazu traf der MAMI-Elektronenstrahl auf einen Radiator, typischerweise ein dünnes Metall oder ein Diamant mit einer Dicke von 10 bis 100  $\mu\text{m}$ , und wurde gestreut, dabei wird aufgrund der Impulserhaltung ein Photon abgestrahlt:

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

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

$$E_\gamma = E_e - E_{e-} \quad (2.2)$$

Dabei war  $E_e$  die Energie des Elektronenstrahls und  $E_{e-}$  die Energie der gestreuten Elektronen, welche durch den Glasgow-Mainz-Tagger bestimmt wurde, dieser trennt zusätzlich den Photonen- von dem Elektronenstrahl. Durch einen Dipol wurden die Elektronen ohne Bremsstrahlung, das heißt ohne Energieverlust, abgelenkt und, je nach Energie, auf einen bestimmten Abschnitt des Tagger-Elektronenleiters fokussiert. Die Tagger-Elektronenleiter bestand aus 353 Szintillatoren, welche sich jeweils zur Hälfte überlappten. Dadurch ergaben sich 352 Kanäle mit einer Energieauflösung von  $\Delta E \approx 2$  MeV bzw. 4 MeV bei einer Strahlenenergie von  $E_e = 800$  MeV bzw. 1.5 GeV. Folglich ließ sich der Impuls über den Auftreffort bestimmen und dadurch die Energie der Elektronen. Die Energie der Photonen konnte dann mit Gleichung 2.2 errechnet werden.

### 2.3. Das Detektorsystem

Nach seiner Erzeugung traf der Photonenstrahl auf ein ca. 10 cm langes Flüssig-Wasserstoff-Target, welches sich im Zentrum des Crystal-Balls (CB) befand. Die erzeugten und gestreuten Teilchen konnten dann durch ein System von Detektoren bestehend aus dem Crystal-Ball Detektor, einem Teilchenidentifikationsdetektor (PID<sup>4</sup>), zwei Vieldrahtproportionalkammern (MWPC<sup>5</sup>) und einem Photonenpektro-

<sup>4</sup>Particle Identification Detector

<sup>5</sup>Multi-Wire Proportional Chamber

## 2. Experimenteller Aufbau am MAMI

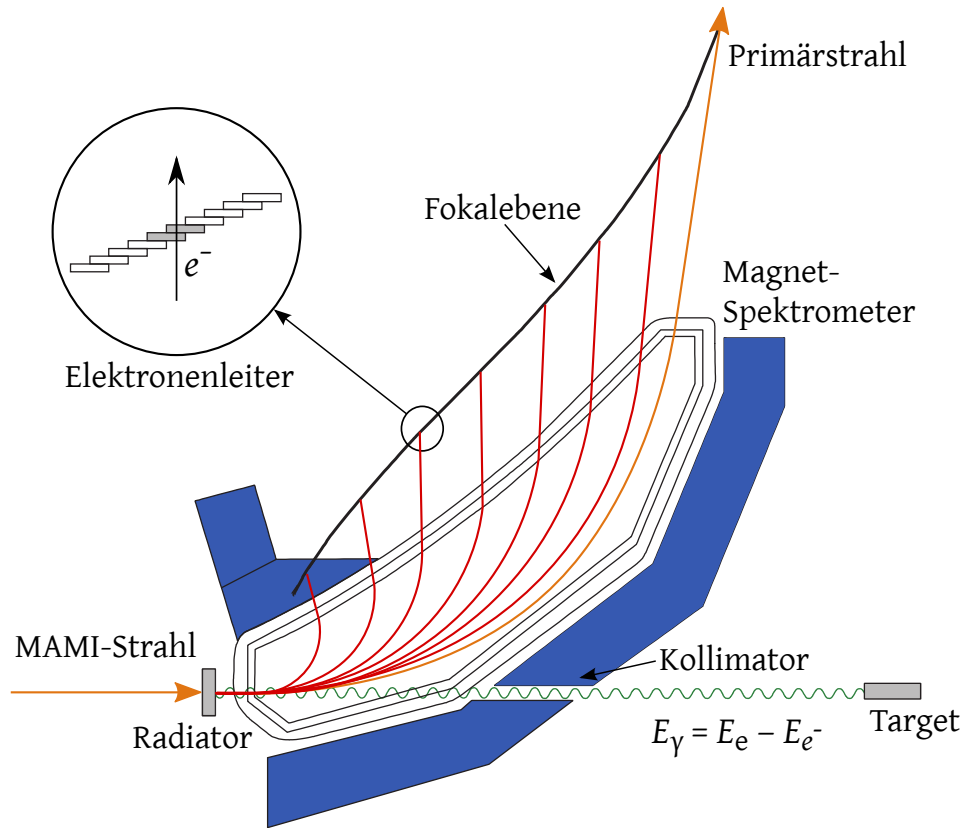


Abbildung 2.3.: Der Glasgow-Mainz-Tagger: Am Radiator entstanden durch Bremsstrahlung Photonen, welche den Kollimator passierten und auf das Target trafen. Die Elektronen wurden durch den Dipol auf den Elektronenleiter angelenkt, wodurch sich ihre Energie bestimmen ließ[Un08]

meter (TAPS<sup>6</sup>) nachgewiesen werden. Der PID und die MWPC waren im Inneren des CB angebracht. Der TAPS wurde am Ausgang des CB platziert, um einen fast vollständig abgedeckten Raumwinkel zu erreichen.

### 2.3.1. Der Crystal-Ball-Detektor

Ursprünglich wurde der Crystal-Ball Detektor Anfang der 70er Jahre am SPEAR<sup>7</sup> zur Entdeckung des  $J/\Psi$ -Mesons entwickelt. Später wurde mit seiner Hilfe das Bottom-Quark am DESY<sup>8</sup> und Baryonenresonanzen am BNL<sup>9</sup> untersucht. Seit November 2002

<sup>6</sup>Two Arm Photon Spectrometer

<sup>7</sup>Stanford Positron Electron Asymmetric Ring

<sup>8</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron

<sup>9</sup>Brookhaven National Laboratory

## 2. Experimenteller Aufbau am MAMI

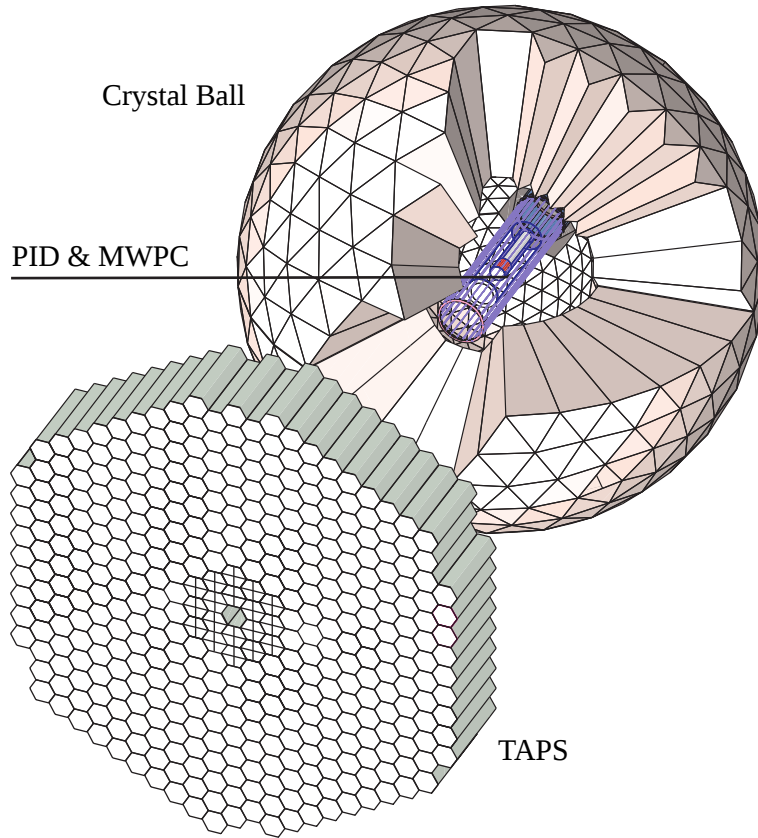


Abbildung 2.4.: Anordnung des Detektorsystems: Im Zentrum des sphärischen Kalorimeters (CB) befanden sich der Detektor zur Teilchenidentifikation (PID) und zwei zur Bestimmung der Teilchen-Trajektorie (MWPC). Die TAPS-Wand befand sich am Ausgang des CB und sorgte dafür, dass der CB einen Raumwinkel von fast  $4\pi$  abdeckte[We13]

stand der Crystal-Ball Detektor der A2-Kollaboration am MAMI für Experimente mit reellen Photonen zur Verfügung.

Der Crystal-Ball war ein Kalorimeter bestehend aus 672 Natriumiodid (NaI) Szintillatoren, welche so angeordnet waren, dass 93,3% des Raumwinkels abgedeckt werden konnte. Die Geometrie basierte auf der Form eines Ikosaeders, ein Würfel bestehend aus 20 gleichgroßen gleichseitigen Dreiecken. Jedes dieser Dreiecke war weiter aufgeteilt in vier kleinere gleichseitige Dreiecke, welche wiederum jeweils in neun gleichseitige Dreiecke unterteilt waren. Somit ergaben sich 720 gleichseitige Flächen. Aufgrund der hohen Zahl der Flächen erinnerte der Crystal-Ball an eine Hohlkugel mit einem außen Radius 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

## 2. Experimenteller Aufbau am MAMI

entfernt werden, wodurch insgesamt 672 Detektoren angebracht werden konnten. Die NaI-Szintillatorkristalle waren ca. 40 cm ( $\sim 15,7$  Strahlungslängen) lang, hatten 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 deckte etwa 0,14 % des Raumwinkels ab und wurde durch einen eigenen Photoelektronenvervielfacher (PMT<sup>10</sup>) ausgelesen.

### 2.3.2. TAPS, PID & MWPC

Der PID hatte eine zylindrische Form mit einem Durchmesser von 116,5 mm und bestand aus 24 einzelnen Szintillatoren, welche jeweils 500 mm lang, 15,3 mm breit und 4 mm dick waren. Da die Szintillatoren nur eine geringe Dicke aufwiesen, verloren Photonen beim durchfliegen weniger als 1% ihrer Energie. Geladene Teilchen auf der anderen Seite erfuhren einen Energieverlust  $\Delta E$ . Ihre restliche Energie wurde im Crystal-Ball abgegeben. Folglich konnte der PID zwischen geladenen und ungeladenen Teilchen unterscheiden.

Außerhalb des PIDs waren die MWPCs angebracht. Dabei handelte es sich um zwei, aus Anodendrähten aufgebauten, Ioniastionskammern in Form von Zylindern. Die Anodendrähte waren parallel zur Strahlenachse ausgerichtet und befanden sich zwischen zwei Lagen von spiralförmigen Kathodenstreifen.

Da die A2-Kollaborations Experimente mit einem Fixed-Target untersucht und der Crystal-Ball zwei *Löcher* für einen Strahleneingang und -ausgang besaß, wurde die TAPS-Wand entwickelt. Diese deckte einen Polarwinkel zur Strahlenachse von  $1,2^\circ$  bis  $20^\circ$  ab. Sie wurde etwa 1,5 m vom Mittelpunkt des CB entfernt positioniert und bestand aus 72 PbWO<sub>4</sub> und 366 BaF<sub>2</sub> Szintillatorkristallen. Somit konnte mit diesem Detektorsystem ein Raumwinkel von fast 97% abgedeckt werden.

---

<sup>10</sup>PhotoMultiplier-Tube

### 3. Herleitung der Formel zur Berechnung der invarianten Masse

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

$$p_{\pi^0}^\mu = \begin{pmatrix} E_{\pi^0} \\ \vec{p}_{\pi^0} \end{pmatrix}, p_1^\mu = \begin{pmatrix} E_1 \\ \vec{p}_1 \end{pmatrix} \text{ und } p_2^\mu = \begin{pmatrix} E_2 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

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

Aufgrund der Energie- und Impulserhaltung gilt:

$$p_{\pi^0}^\mu = p_1^\mu + p_2^\mu \quad (3.2)$$

Diese Gleichung kann nun quadriert werden:

$$\begin{aligned} \rightarrow m_{\pi^0}^2 &= (p_1^\mu + p_2^\mu)^2 \\ &= \underbrace{p_1^{\mu^2}}_{=m_1^2} + \underbrace{p_2^{\mu^2}}_{=m_2^2} - 2p_1^\mu p_2^\mu \\ &= m_1^2 + m_2^2 - 2E_1 E_2 + 2\vec{p}_1 \vec{p}_2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 - 2E_1 E_2 + 2|\vec{p}_1||\vec{p}_2|\cos(\vartheta) \\ &\quad \text{mit } \vartheta = \angle(\vec{p}_1, \vec{p}_2) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Da mit dem Crystal-Ball nur Photonen detektiert werden konnten, wird angenommen, dass es sich bei den beiden registrierten 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, welchen in die beiden Photonen zerfallen ist, durch

$$\Rightarrow m_{\pi^0} = \sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos(\vartheta))} \quad (3.4)$$

berechnen.

Durch den Crystal-Ball waren alle Variablen in dieser Gleichung bekannt. So konnte die Energie der Photonen bestimmt werden und durch Kenntnis des Auftreffortes der Photonen im Crystal-Ball konnte der Winkel zwischen den beiden Photonen errechnet werden, dazu musste allerdings angenommen werden, dass das  $\pi^0$  im Zentrum des Targets zerfällt. Mehr dazu in Kapitel 4.3.

## 4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

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

Zur Analyse wurde ANT<sup>1</sup> benutzt. Damit konnten auch alle gewünschten Bedingungen eingestellt werden.

### 4.1. Energie-Interval Abhängigkeit

Als erstes wurde überprüft, ob es eine Abhängigkeit der Kalibrierung im Bereich verschiedener Energieintervalle gab. Sprich, stimmt die Kalibrierung auch dann noch, wenn die Energie der beiden detektierten Photonen sich ähnelte. Dazu wurden die Daten der Strahlzeit aus dem Jahr 2014 genommen. Aus diesen Daten konnte mit der Gleichung 3.4 die invariante Masse des  $\pi^0$  berechnet werden.

Damit wurde schließlich ein zweidimensionales Histogramm angelegt, mit der invarianten Masse auf der x-Achse. Auf der y-Achse wurde die Energie der Photonen aufgetragen, welche in Intervalle mit einer Breite von etwa 22 MeV unterteilt wurden. Beim Füllen des Histogramms wurde darauf geachtet, dass sich die Energien der beiden Photonen im gleichen Intervall befanden.

Im folgenden wurden nur die Energieintervalle für Photonen von 122 MeV bis 444 MeV berücksichtigt. Dieser Bereich wurde bewusst gewählt, da für kleinere Energien der Peak des  $\pi^0$  zu stark durch das Rauschen gestört wurde und somit die Position nicht eindeutig bestimmt werden konnte. Für Energien oberhalb von 444 MeV lagen nicht mehr genug Ereignisse vor, sodass höhere Energieintervalle ebenfalls verworfen werden mussten. Diese etwas krummen Werte für die Begrenzung ergaben sich dadurch, dass unbeabsichtigt die falsche Binanzahl angegeben wurde und dies zu spät bemerkt wurde.

Um nun die Position des  $\pi^0$  zu bestimmen, wurde für jedes Intervall über den Bereich der errechneten invarianten Masse von 70 MeV bis 180 MeV gefittet. Die Einschränkung des Bereichs ermöglichte einen besseren Fit.

Beim Fit wurde zuerst der Untergrund mit einem Polynom vierten Grades gefittet, in Abbildung 4.2 blau dargestellt. Von den Daten konnte damit der Untergrund abgezogen werden, was den einen besseren Gauß-Fit (grün) des Peaks ermöglichte. Damit

---

<sup>1</sup>Analysis Toolkit

#### 4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

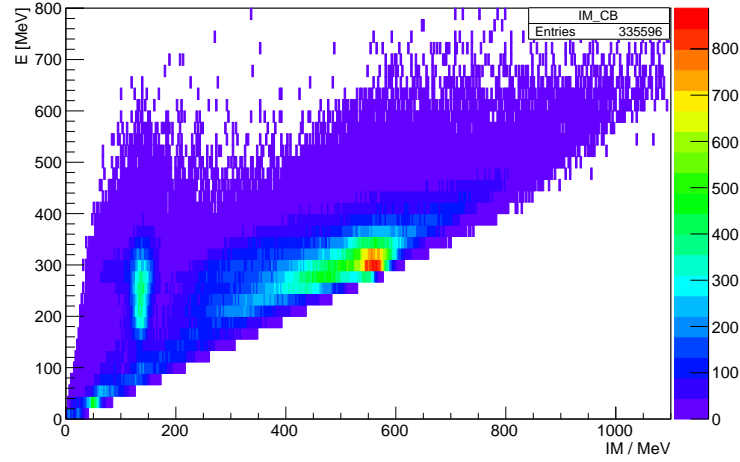


Abbildung 4.1.: 2-D Histogramm: Auf der x-Achse ist die errechnete invariante Masse aufgetragen, die y-Achse ist in 22,2 MeV Intervalle aufgeteilt. Es wurden nur dann die Invariante Masse errechnet, wenn sich die Energie beider Photonen im gleichen Intervall befanden.

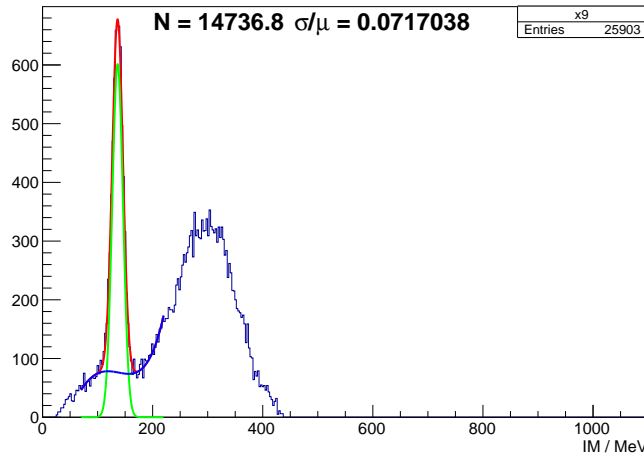


Abbildung 4.2.: Beispiel eines Fits. Es handelt sich dabei um das Energieintervall von 177 MeV bis 200 MeV mit der Bedingung, dass sich die Energie der Photonen im gleichem Intervall befanden. Zu erkennen ist der Untergrundfit (Blau), der Gaußfit (Grün) und die Kombination (Rot). Alle weiteren Fits mit dieser Bedingung sind in Abb. A.1 zu sehen.

#### 4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

leichter überprüft werden konnte, ob der Fit sinnvoll war, wurde beide Fits addiert und zusätzlich in den Graphen gezeichnet (Rot). Folglich konnte aus den Fitdaten die Position des  $\pi^0$ -Peaks abgelesen werden.

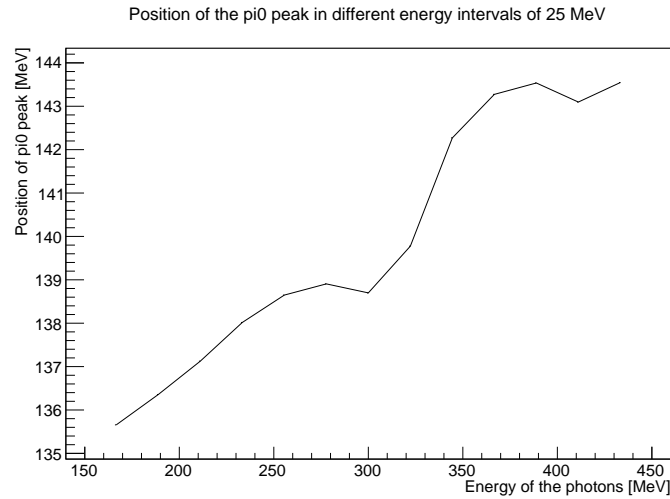


Abbildung 4.3.: Die aus Abbildung 4.1 errechnete Position des  $\pi^0$  Peaks wurde gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Es galt die Bedingung, dass die Energie der Photonen sich ähneln sollte.

In Abbildung 4.3 wurden die errechneten Positionen der Pionen gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Zu sehen ist eine deutliche Abweichung zum Literaturwert des  $\pi^0$  Peaks. Auch nahm die Abweichung für größere Energien zu und betrug teilweise über 6% (vgl. Abb.:A.2).

Daraus folgte, dass eine Abhängigkeit zwischen der Position des  $\pi^0$ -Peaks und der Energie vorlag, wenn sich die Photonen energetisch ähnelten.

Daraufhin wurde das gleiche Verfahren nochmal angewendet, allerdings wurde dieses mal die Bedingung weggelassen, dass die Photonen sich energetisch ähneln sollen. Das heißt, aus den beiden Photonen wurde die invariante Masse berechnet und dann wurden beide Photonen in das Histogramm A.3 eingetragen. Die Fits der einzelnen Intervalle sind in Abbildung A.4 zu sehen.

Nun wurden die errechneten invarianten Massen des  $\pi^0$  gegen die Energien der Photonen aufgetragen, zu sehen in Abbildung 4.4.

Auch hier war eine deutliche Abweichung der Position des  $\pi^0$  zum Literaturwert zu erkennen. Diese Abweichungen betrugen zwar nur fast 2% (siehe Abb. A.5), sind aber nicht vernachlässigbar.



#### 4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

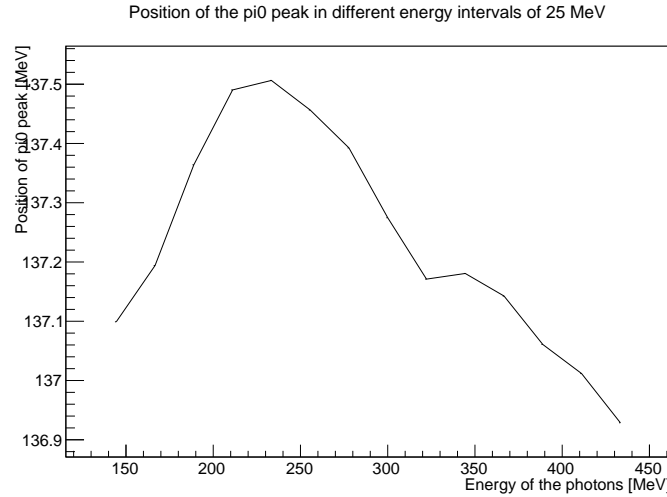


Abbildung 4.4.: Die errechneten Werte der  $\pi^0$  wurden gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Keine Bedingung; es wurden alle Photonen berücksichtigt

#### 4.2. Vernachlässigung der Detektoren am Rand

Ein weiteres Problem war, der Aufbau des Crystal-Ball Detektors. Genauer gesagt, der Strahlenein- und -ausgang. Denn durch diese hatten die Detektoren im Crystal-Ball nicht alle gleich viele Nachbar Detektoren und da ein Photon seine gesamte Energie nicht an einen Detektorkristall abgab, sondern immer auch an seine Nachbarn, konnten diese Randdetektoren nicht ideal kalibriert werden. Deswegen wurden zur Untersuchung in diesem Kapitel die Detektoren am Rand nicht berücksichtigt. Diesmal wurden keine reellen Daten aus Strahlzeiten genommen, sondern es wurde auf Simulationen zurückgegriffen. In diesem Fall auf den sogenannten Cocktail. Im Cocktail waren alle möglichen Prozesse enthalten, daher hatte er auch seinen Namen. Diese Prozesse wurden durch Pluto, eine Monte-Carlo basierende Simulation, generiert. Das Verhalten des Crystal-Ball Detektors wurde mittels GEANT4<sup>2</sup>, einer Simulation, um das Durchdringen von Partikeln durch Materie zu beschreiben, simuliert. Durch diese beiden Simulationen konnte das Rauschen minimiert und so der  $\pi^0$ -Peak genauer bestimmt werden.

Da es sich hierbei um Simulationen handelte, wusste man, welche Photonen durch welchen Prozess erzeugt wurden. Folglich konnte alles so einstellen werden, dass aus dem Cocktail nur  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  Prozesse betrachtet wurden.

In erster Linie war es wichtig einen Vergleich zwischen der  $\pi^0$  Position mit und ohne Berücksichtigung der Detektoren am Rand zu erhalten. Zusätzlich wurde, wie in Kapitel 4.1, die Energie der Photonen in Intervallen betrachtet, ohne die Bedingung,

---

<sup>2</sup>Geometry And Tracking

#### 4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

dass die Histogramme nur gefüllt werden dürfen, wenn sich die Energie der Photonen im gleichem Intervall befand.

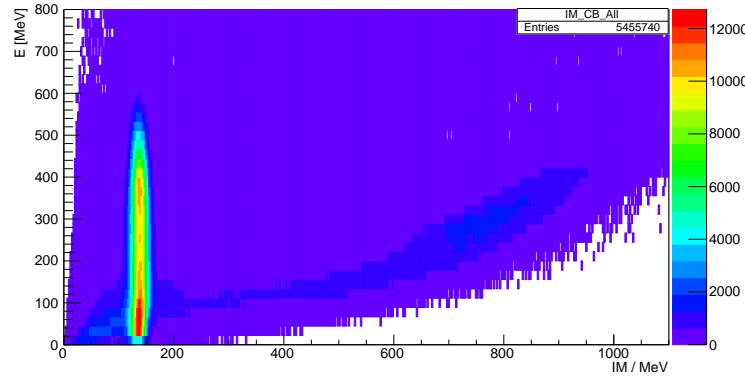


Abbildung 4.5.: 2-D Histogramm: Auf der x-Achse ist die errechnete invariante Masse und auf der y-Achse ist der Energie der Photonen aufgetragen. Die y-Achse ist in Energieintervalle der Breite 25 MeV unterteilt

Das gefüllte Histogramm ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Hier erkennt man auch direkt, dass simulierte Daten benutzt wurden, da der  $\pi^0$ -Peak viel stärker ausgeprägt war, im Vergleich zu den reellen Daten.

Die Vermutung war, wie bereits erwähnt, dass die Detektoren am Rand schlecht kalibriert waren. Deswegen wurden diese nicht betrachtet, dies erreichte man dadurch, dass alle Reaktionen, die ein oder mehr Photonen besaßen, welche einen Winkel von  $30^\circ$  oder weniger zur Strahlenachse hatten, verworfen wurden. Diese Gradzahl wurde durch eine Abschätzung errechnet. Die Öffnungen für den Strahlenein- und ausgang hatten einen 'Radius' von 2 Detektoren, und erstreckte sich über einen Polarwinkel von  $20^\circ$ . Folglich hätte ein Ring aus Detektoren um diese Öffnungen einen Polarwinkel von  $10^\circ$ .

Sowohl für den Strahlenein- als auch ausgang wurden die Detektoren am Rand vernachlässigt. Auch für diese Bedingung wurde anschließend ein Histogramm angelegt (Abb.: A.7) und die einzelnen Positionen wurden dann gefittet (Abb.: A.8), um die Position des  $\pi^0$  zu bestimmen. Das Intervall das betrachtet und gefittet wurde Zum besseren Vergleich der beiden Ergebnisse, wurden die relative Abweichungen mit und ohne Bedingung zusammen in einen Graphen gezeichnet. In diesem erkennt man, dass der Unterschied nur sehr klein ist und weniger als 0,1% beträgt. Bei einem so kleinen Unterschied kann man nicht mit Gewissheit sagen, dass der Cut bei  $30^\circ$  eine Verbesserung der  $\pi^0$ -Peak Position bewirkt hat. Die Differenz ist noch im Bereich der statistischen Fluktuation.

#### 4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

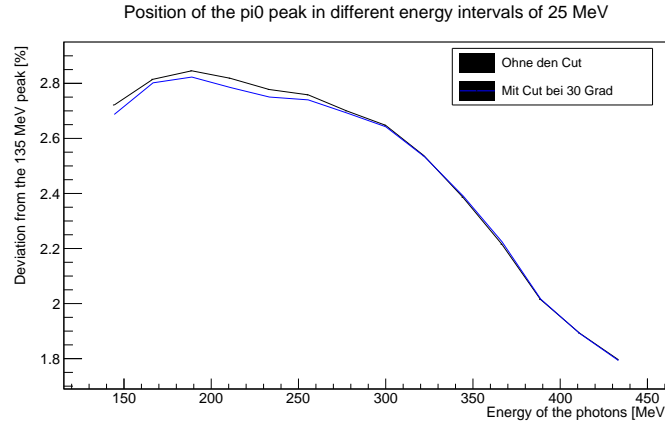


Abbildung 4.6.: Die relative Abweichung wurde in Prozent gegen die Energie der Photonen gezeichnet. Die schwarze Linie stellt die relative Abweichung ohne die Bedingung, dass Photonen mit einem Winkel kleiner als  $30^\circ$  verworfen wurden, die blaue Linie mit der Bedingung.

### 4.3. Z-Vertex Abhängigkeit

Ein weiterer Aspekt der überprüft wurde, war die Abhängigkeit zwischen der errechneten Position des  $\pi^0$ -Peaks und dem Ort im Target in dem das Pion entstanden und zerfallen war. Da die Lebenszeit eines Pions nur etwa  $8,5 \cdot 10^{-17}$  Sekunden beträgt, würde ein Pion bei Lichtgeschwindigkeit eine Strecke von ca. 25 nm zurücklegen. Folglich konnte angenommen werden, dass das Pion am gleichem Ort zerfällt, an dem es auch entsteht.

Hier wurde schließlich ein weiterer Vorteil der Simulation ausgenutzt. Bei einer Simulation sind alle Prozesse genau bekannt. Von jedem Prozess wusste man demnach auch den genauen Ort an dem er sich ereignete. Bei reellen Messdaten war dies nicht möglich, da der Crystal-Ball keinen Detektor besaß, um den Ort des Zerfalls zu bestimmen.

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

Anschließend wurde 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. Hier ist schließlich dann auch die im Programm falsch angegebene Binnzahl aufgefallen, die dafür gesorgt hat, dass die Energie der Photon in Intervalle mit etwas krummen Zahlen aufgeteilt wurden, sodass diese geändert wurden. Die neuen Intervalle reichten von 125 MeV bis 450 MeV und hatten eine Breite von 25 MeV.

#### 4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

Das 3-D Z-Vertex Histogramm wurde dann mit den Daten aus der Cocktail Simulation gefüllt. Auch hier wurden nur die Prozesse betrachtet, in denen ein  $\pi^0$  entstanden ist.

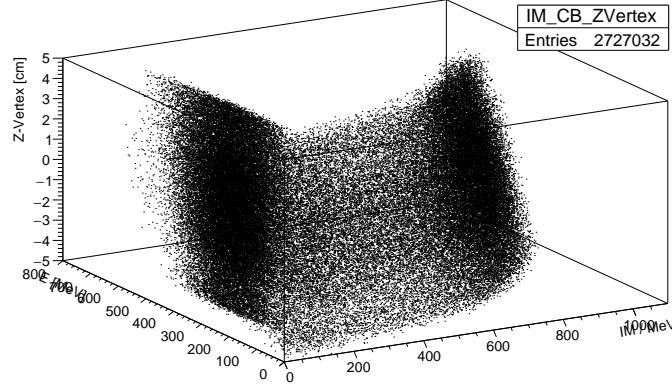


Abbildung 4.7.: Dreidimensionales Histogramm zur Untersuchung der Z-Vertex Abhängigkeit. Auf der z-Achse ist das Intervall des Z-Vertex mit einer Breite von 1 cm aufgetragen. Auf der x-Achse ist die errechnete invariante Masse und auf der y-Achse die Energie der Photonen aufgetragen.

Daraus konnte dann die Position des  $\pi^0$ -Peaks in Abhängigkeit zum Z-Vertex Intervall berechnet werden, dazu wurde jedes Z-Intervall einzeln betrachtet und die Position abhängig von der Energie der Photonen, wie in den voran gehenden Kapiteln, berechnet. Diese 10 Z-Vertex Abhängigkeiten wurden anschließend in Abbildung 4.8 eingetragen.

Wie zu erwarten war, ergaben verschiedene Z-Vertices unterschiedliche Abweichungen des Peaks. So war die Abweichung größer, wenn die Bedingung galt, dass das  $\pi^0$  am Rand des Targets zerfällt, als wenn nur Zerfälle in der Mitte des Targets betrachtet wurden. Dies lag daran, dass zur Kalibrierung des Crystal-Ball angenommen wurde, dass das Meson im Zentrum des Targets zerfällt. Das hatte zur Folge, dass der Winkel aus Gleichung 3.4 verfälscht wurde, wenn ein Zerfall außerhalb des Zentrum des Targets betrachtet wurde. Der Grund dafür war, dass beim Zerfall des  $\pi^0$  die meisten Photonen in Strahlrichtung entstehen. Folglich hebten sich die Abweichungen im Winkel nicht mit der Statistik weg, sondern es gab eine inhomogene Verteilung der Winkel.

Auch zu sehen ist, dass der Abstand der Linien war für niedrige Energie, fast durchgehend, ca. 1% beträgt, ausgenommen ist das Intervall von -5 cm bis -4 cm. Auch war zu erkennen, dass die einzelnen Abweichungen sich für größere Energien der ca. 2% Abweichung annäherten. Eine solche Abweichung war bereits in Kapitel 4.2 zu erkennen, dort wurde der Z-Vertex nicht in Intervalle unterteilt, sondern als ganzes betrachtet.

#### 4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

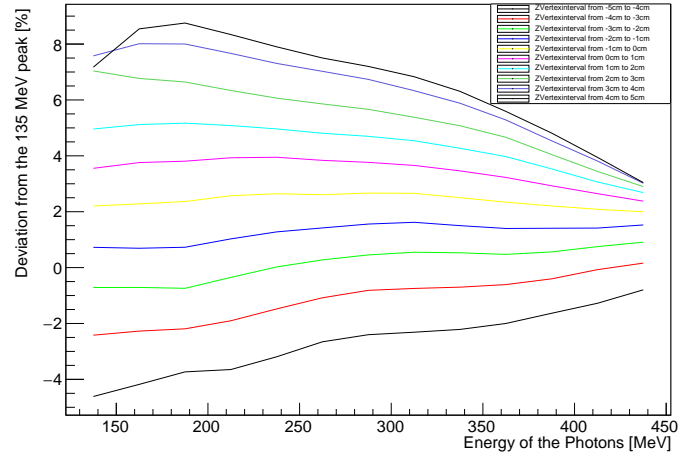


Abbildung 4.8.: Die Abweichung der  $\pi^0$ -Peak Position für verschiedene Intervalle des Z-Vertex gegen die Energie der gemessenen Photonen. Beachte: Die unterste Linie repräsentiert das Intervall von -5 cm bis -4 cm, das darüber von -4 cm bis -3 cm usw.

## **5. Zusammenfassung und Ausblick**

# A. Anhang

## A.1. Tabellen und Abbildungen

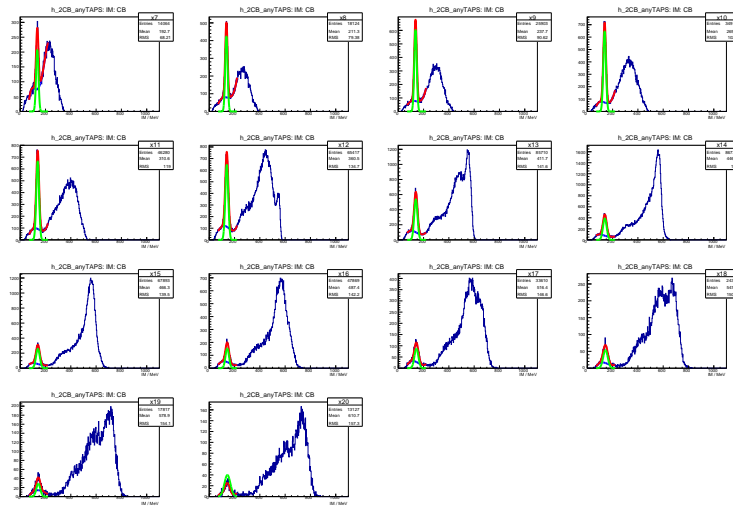


Abbildung A.1.: Alle Fits der Energieintervalle mit der Bedingung, dass sich die Photonen sich energetisch ähneln. Oben links ist wurde das Intervall 122 -155 MeV gefittet. Das nächste ist das Intervall von 155 - 278 MeV usw.

## A.2. Weiterführende Details zur Arbeit

Manch wichtiger Teil Ihrer tatsächlichen Arbeit ist zu technisch und würde den Hauptteil des Textes unübersichtlich machen, beispielsweise wenn es um die Details des Versuchsaufbaus in einer experimentellen Arbeit oder um den für eine numerische Auswertung verwendeten Algorithmus geht. Dennoch ist es sinnvoll, entsprechende Beschreibungen in einem Anhang Ihrer Bachelorarbeit aufzunehmen. Insbesondere für zukünftige Arbeiten, die an Ihre Bachelorarbeit anschließen, sind dies manchmal hilfreiche Informationen.

## A. Anhang

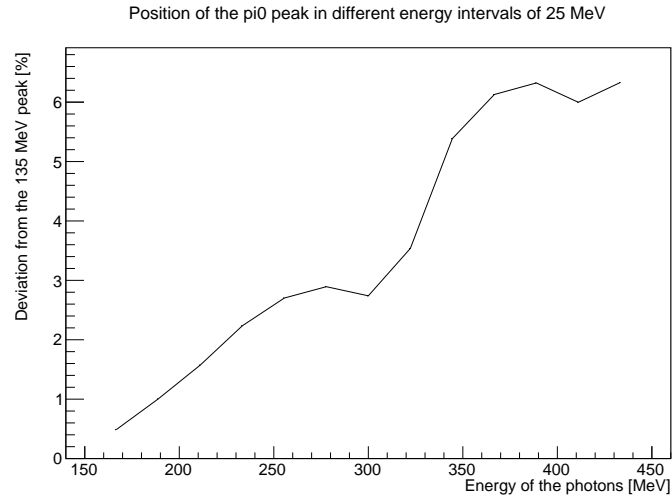


Abbildung A.2.: Die relative Abweichung des errechneten  $\pi^0$ -Peaks aus Abbildung 4.1 von dem Literaturwert. Die Abweichung wurde in Prozent gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Position des  $\pi^0$  Peaks wurde gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Größere Energieintervalle wurden aufgrund zu kleiner Statistik nicht berücksichtigt. Für kleinere Energien konnten keine  $\pi^0$  Teilchen erzeugt werden

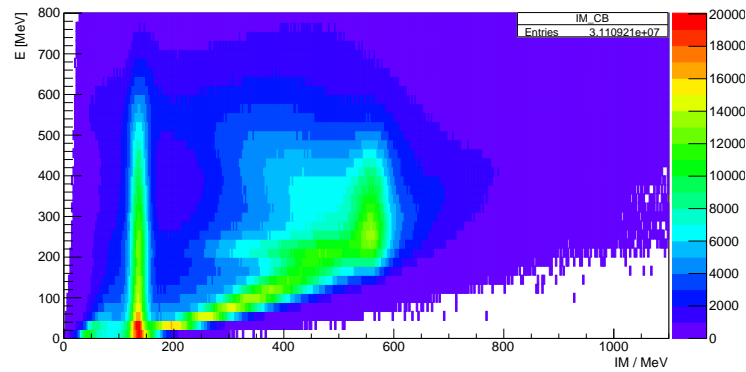


Abbildung A.3.: Zwei zweidimensionales Histogramm. Auf der x-Achse ist die errechnete invariante Masse aufgetragen, auf der y-Achse sind die Energien der Photonen. Das Histogramm wurde mit jedem Photonenpaar gefüllt. Es gab also keine Einschränkung



## A. Anhang

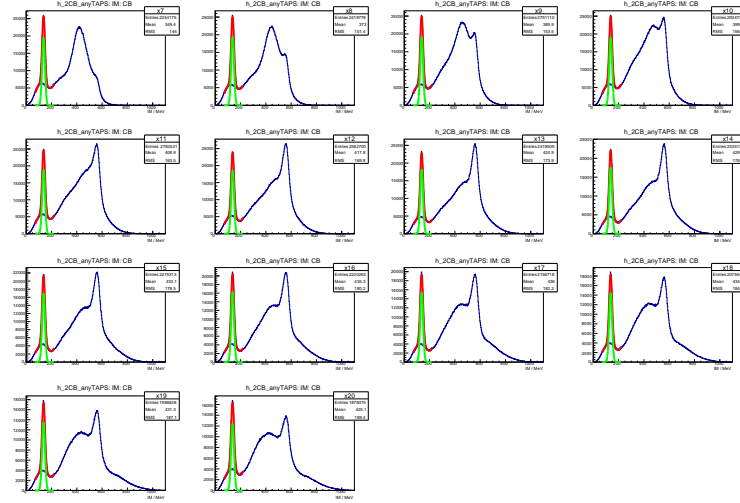


Abbildung A.4.: Alle Fits der Energieintervalle, ohne die Bedingung, dass die beiden Photonen energetisch ähnlich waren. Oben links ist wurde das Intervall 122 -155 MeV gefittet. Das nächste ist das Intervall von 155 - 278 MeV usw.

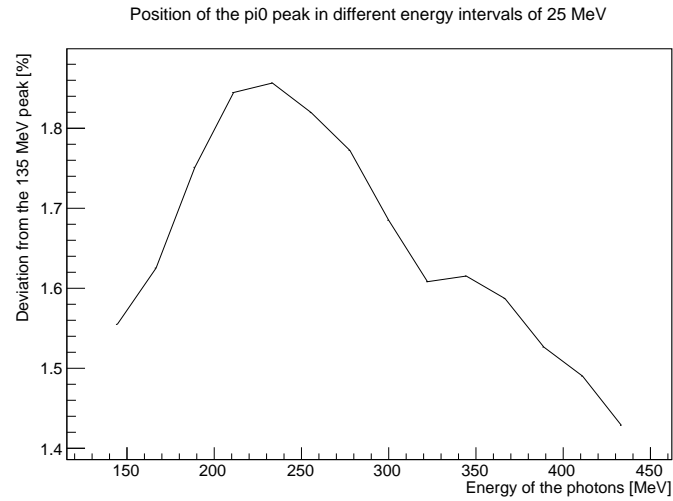


Abbildung A.5.: Die relative Abweichung der errechneten  $\pi^0$  Position, ohne die Bedingung, dass die Photonen sich energetisch ähneln

## A. Anhang

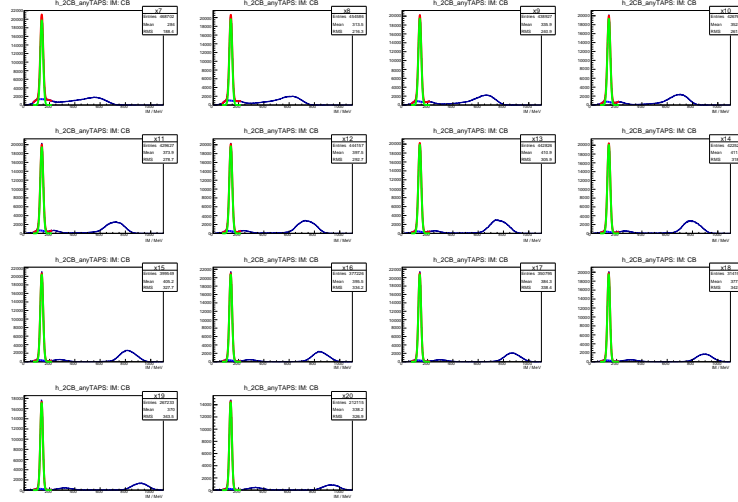


Abbildung A.6.: Alle Fits der Energieintervalle zur Bestimmung des  $\pi^0$ . Es galt keine weitere Bedingung. Daten stammen aus einer Simulation (Cocktail). Oben links ist wurde das Intervall 122 - 155 MeV gefittet. Das nächste ist das Intervall von 155 - 278 MeV usw.

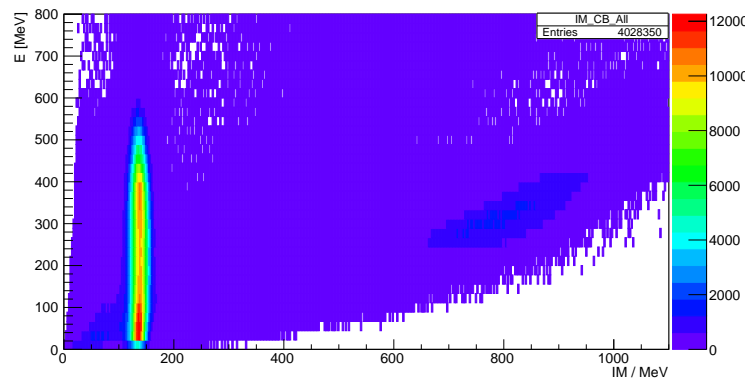


Abbildung A.7.: Energie der Photonen gegen die errechnete invariante Masse mit der Bedingung, dass die Detektoren am Rand nicht berücksichtigt werden

## A. Anhang

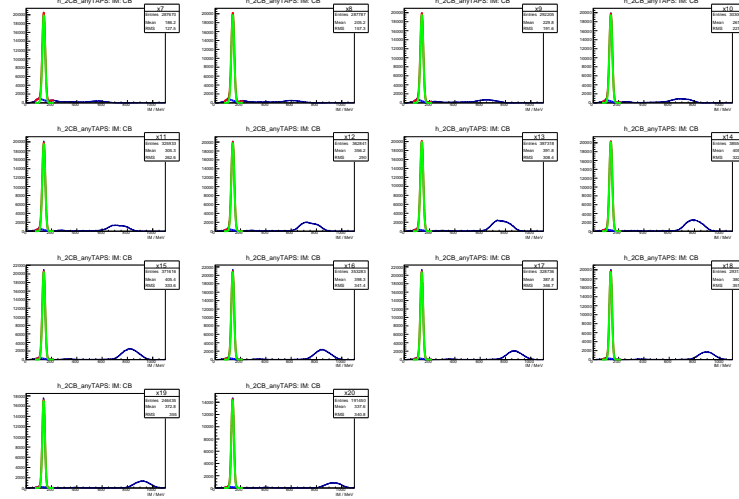


Abbildung A.8.: Alle Fits der Energieintervalle zur Bestimmung des  $\pi^0$ . Mit der Bedingung, dass die Detektoren am Rand vernachlässigt wurden. Daten stammen aus einer Simulation (Cocktail). Oben links ist wurde das Intervall 122 -155 MeV gefittet. Das nächste ist das Intervall von 155 - 278 MeV usw.

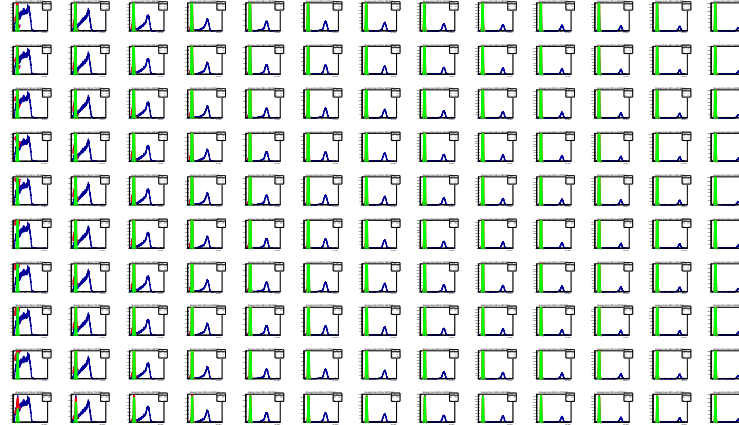


Abbildung A.9.: Hier werden alle Fits zur Bestimmung der  $\pi^0$  Position für verschiedene Z-Vertizes aufgelistet. Die erste Zeile ist das Z-Vertex Intervall von -5 cm bis -4 cm das nächste von -4 cm bis -3 cm usw. Die Energienintervalle der Photonen sind in den Titeln der einzelnen Fits aufgetragen. Es wurden die Daten aus dem Cocktail benutzt.

# 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  $\alpha$  für den Zerfall  $\eta 3\pi^0$  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*
- [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)
- [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](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 *Partivle Data Group* <http://pdg.lbl.gov/>, (Stand 20.03.2017)
- [De15] Skript & Übungsblätter zur Vorlesung Experimentalphysik Vb WS15/16 Johannes-Gutenberg Universiät Mainz, Prof. Denig [https://reader.uni-mainz.de/WiSe2015-16/08-128-055-00/\\_layouts/15/start.aspx#/Lists/DocumentLib/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=](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)
- [1] B. Freund Nummer eins, Bachelorarbeit, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2012.

## **B. Danksagung**

... an wen auch immer. Denken Sie an Ihre Freundinnen und Freunde, Familie, Lehrer, Berater und Kollegen.