

Systematische Studien zur π^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 1. April 2012

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

1. Einleitung	1
1.1. Motivaton	1
1.2. Gliederung	2
2. Das π^0 Meson	3
3. Experimenteller Aufbau am MAMI	4
3.1. Der MAMI-Beschleuniger	4
3.2. Die Photonenmarkierungsanlage	7
3.3. Das Detektorsystem	7
3.3.1. Der Crystal-Ball-Detektor	8
3.3.2. TAPS, PID & MWPC	10
4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball	11
4.1. Energie-Interval Abhängigkeit	11
5. Zusammenfassung und Ausblick	15
A. Anhang	16
A.1. Tabellen und Abbildungen	16
A.2. Weiterführende Details zur Arbeit	16
B. Literaturverzeichnis	19
C. Danksagung	21

1. Einleitung

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 γ . Dabei wird ein π^0 -Meson erzeugt.

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

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 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 π^0 berechnen lies.

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.

Die Masse des π^0 ist mit 135 MeV wohl bekannt, folglich wurden die Detektoren so eingestellt, dass sich der π^0 -Peak bei dieser Energie befindet.

1. Einleitung

1.2. Gliederung

Die Gliederung

2. Das π^0 Meson

3. Experimenteller Aufbau am MAMI

Der Mainzer Mikrotron (MAMI) war zur Zeit meiner Bachelorarbeit ein mehrstufiger Rennbahn-Teilchenbeschleuniger (RTM¹) 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 (Tagger²) bestimmt werden. Nach der Reaktion mit dem Target wurden die Teilchen durch ein System von verschiedenen Teilchendetektoren nachgewiesen.

3.1. 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 HDSM³ 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.

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

¹Race-Track-Microtron

²to tag = markieren

³Harmonic Double Sided Microtron

3. Experimenteller Aufbau am MAMI

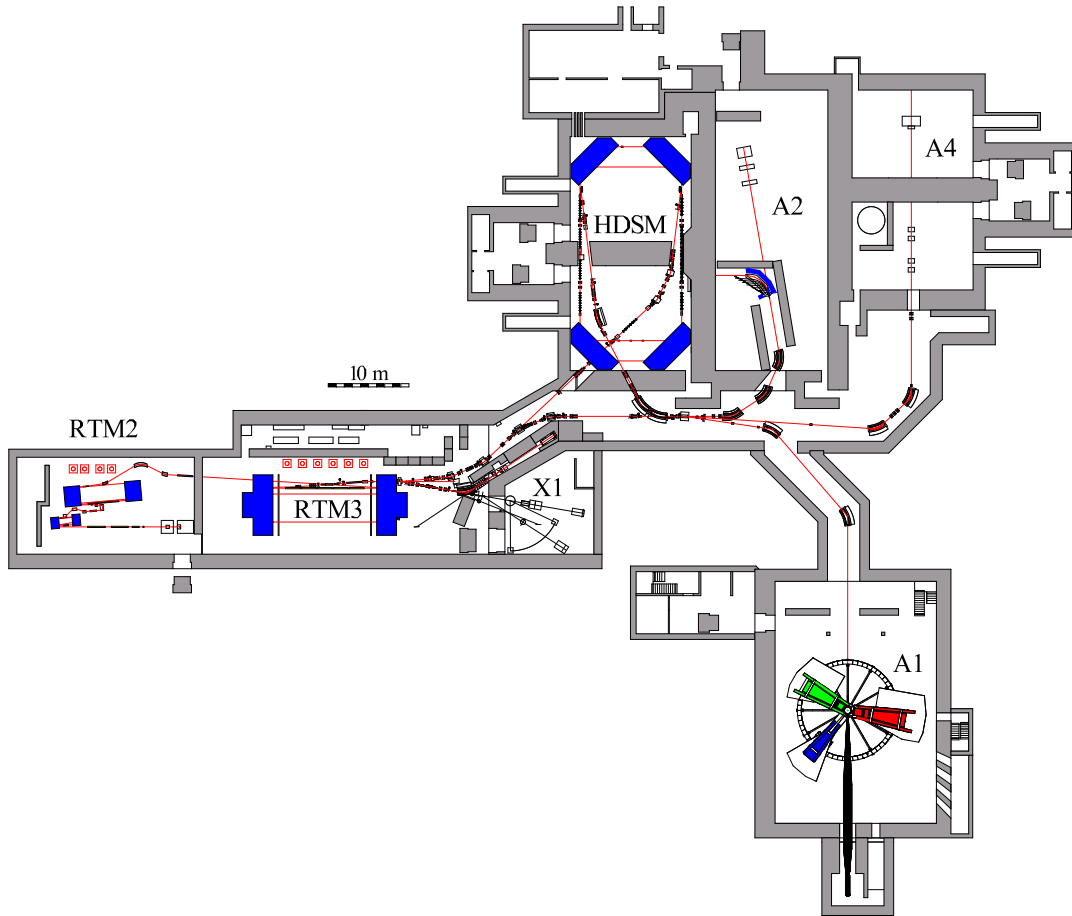


Abbildung 3.1.: Grundriss der Beschleunigeranlage MAMI. Zu sehen sind die drei RTMs, der HDSM der Tagger und die verschiedenen Experimentierhallen: A1 (Elektronenstreuung), A2 (Strukturanalyse von Nukleonen), A4 (Paritätsverletzung) und X1 (Röntgenstrahlung). [KPh07]

man sich dafür, die Elektronen mehrmals durch den gleichen Beschleunigerabschnitt zu beschleunigen. Dazu wurden sie nachdem sie beschleunigt wurden, durch zwei 180° 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

3. Experimenteller Aufbau am MAMI

Kohärenz 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]

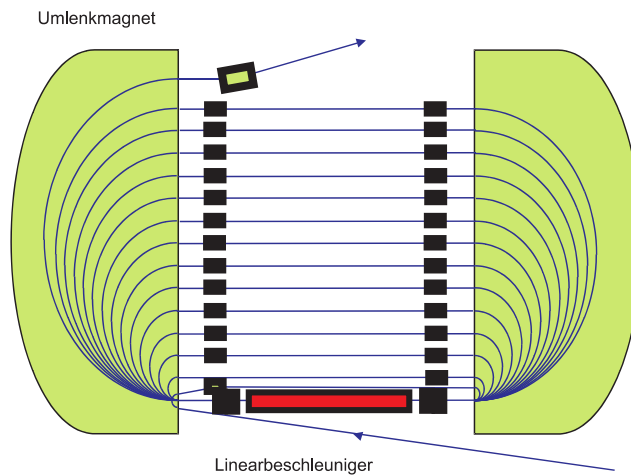


Abbildung 3.2.: Prinzip eines RTM: Der Elektronenstrahl wird immer wieder durch den Linearbeschleuniger geschickt, bis die gewünschte Energie erreicht wurde und der Strahl mittels eines sogenannten Kicker-Magnet zum nächsten Abschnitt weiter geleitet wird.[KPh07]

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].

3. 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 3.1.: Technische Daten der MAMI-Beschleunigerstufen [Un08]

3.2. 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 μm , und wurde gestreut, dabei wird aufgrund der Impulserhaltung ein Photon abgestrahlt:

$$e^- + N \rightarrow N + e^- + \gamma \quad (3.1)$$

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

$$E_\gamma = E_e - E_{e-} \quad (3.2)$$

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 3.2 errechnet werden.

3.3. Das Detektorsystem

Nach seiner Erzeugung traf der Photonenstrahl auf das 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 (PID⁴), zwei Vieldrahtpropor-

⁴Particle Identification Detector

3. Experimenteller Aufbau am MAMI

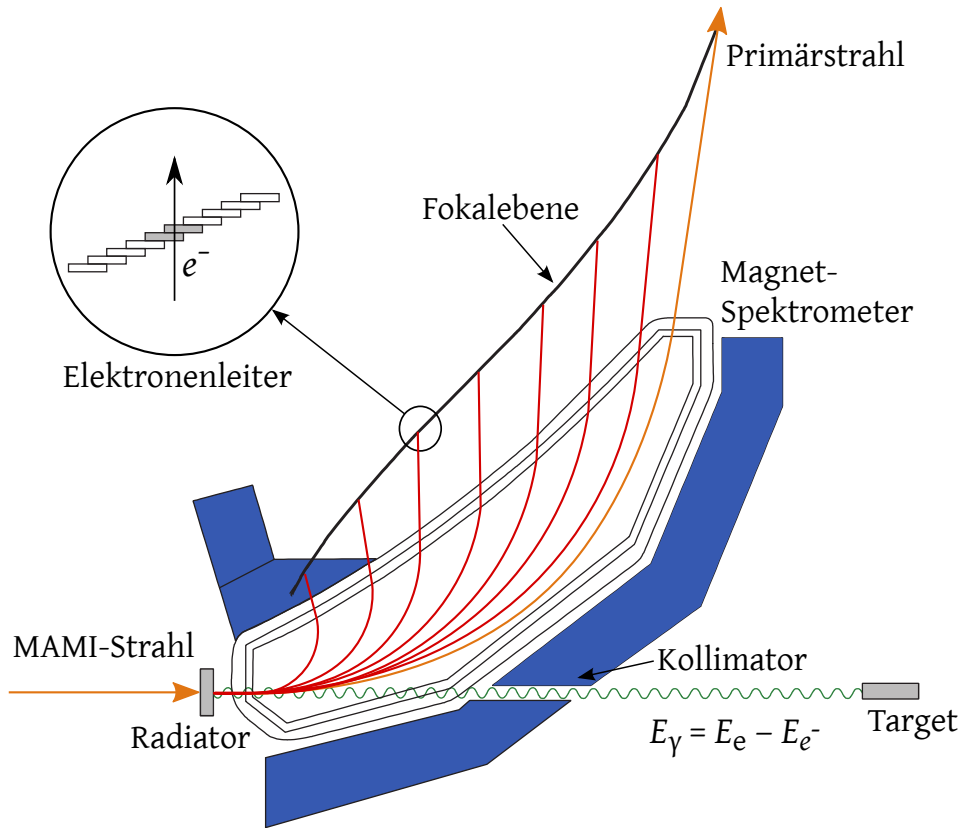


Abbildung 3.3.: Der Glasgow-Mainz-Tagger: Am Radiator entstanden durch Bremsstrahlung Photonen, welche den Kollimator passierten und auf das Target trafen. Die Elektronen wurden durch den Dipol auf den Elektronenleiter angelenkt, wodurch sich ihre Energie bestimmen ließ[Un08]

tionalkammern (MWPC⁵) und einem Photonenspektrometer (TAPS⁶) 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.

3.3.1. Der Crystal-Ball-Detektor

Ursprünglich wurde der Crystal-Ball Detektor Anfang der 70er Jahre am SPEAR⁷ zur Entdeckung des J/ψ -Mesons entwickelt. Später wurde mit seiner Hilfe das Bottom-

⁵Multi-Wire Proportional Chamber

⁶Two Arm Photon Spectrometer

⁷Stanford Positron Electron Asymmetric Ring

3. Experimenteller Aufbau am MAMI

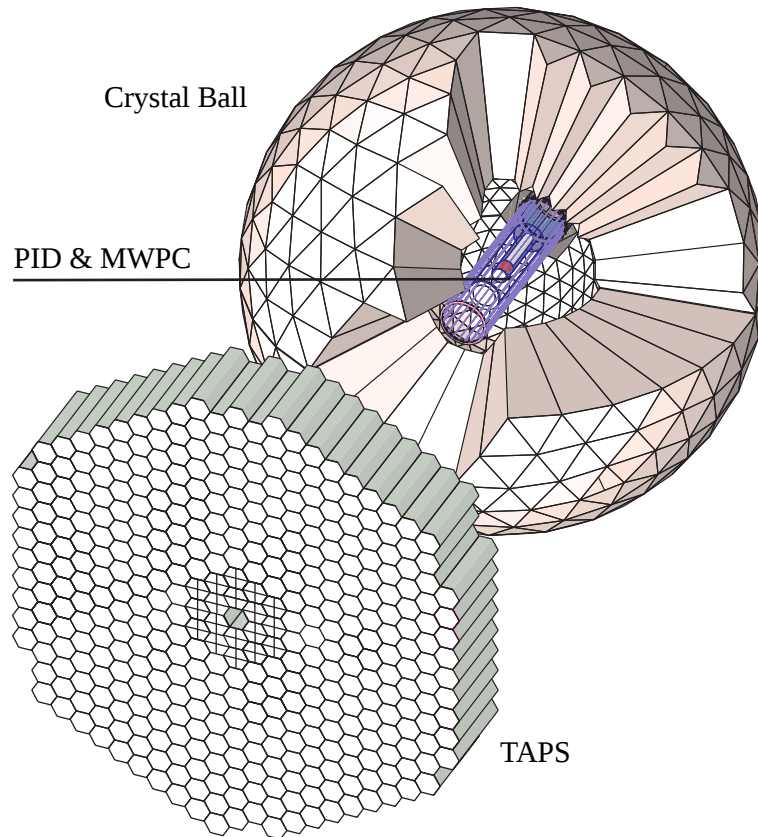


Abbildung 3.4.: Anordnung des Detektorsystems: Im Zentrum des sphärischen Kalorimeters (CB) befanden sich der Detektor zur Teilchenidentifikation (PID) und zwei zur Bestimmung der Teilchen-Trajektorie (MWPC). Die TAPS-Wand befand sich am Ausgang des CB und sorgte dafür, dass der CB einen Raumwinkel von fast 4π abdeckte[We13]

Quark am DESY⁸ und Baryonenresonanzen am BNL⁹ untersucht. Seit November 2002 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

⁸Deutsches Elektronen-Synchrotron

⁹Brookhaven National Laboratory

3. Experimenteller Aufbau am MAMI

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 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 (PTM¹⁰) ausgelesen.

3.3.2. 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 ΔE . 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 Vorwärtswinkel zur Strahlenachse von $1,2^\circ$ bis 20° ab. Sie wurde etwa 1,5 m vom Mittelpunkt des CB entfernt positioniert und bestand aus 72 PbWO₄ und 366 BaF₂ Szintillatorkristallen. Somit konnte mit diesem Detektorsystem ein Raumwinkel von fast 97% abgedeckt werden.

¹⁰PhotoMultiplier-Tube

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

4.1. Energie-Interval Abhängigkeit

Zunächst 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

$$m_{\pi^0} = \sqrt{2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos(\theta))} \quad (4.1)$$

die invariante Masse des π^0 berechnet werden. Dabei sind E_{γ_1} und E_{γ_2} die Energien der beiden Photonen und θ ist der Winkel, zwischen den beiden Photonen. Damit konnte dann ein zweidimensionales Histogramm angelegt werden, 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 25 MeV unterteilt wurden.

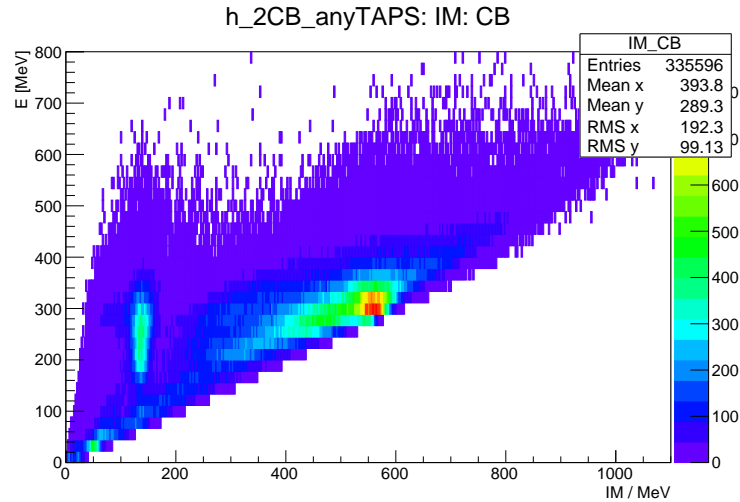


Abbildung 4.1.: 2-D Histogram: Auf der x-Achse ist die errechnete invariante Masse aufgetragen, die y-Achse ist in 25 MeV Intervalle aufgeteilt. Es wurden nur dann die Invariante Masse errechnet, wenn sich die Energie beider Photonen im gleichen Intervall befanden.

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

Beim Füllen des Histogramms wurde darauf geachtet, dass sich die Energien der beiden Photonen im gleichen Intervall befanden.

Formel 4.1 gibt auch die untere Energiegrenze zur Entstehung von π^0 an. Aufgrund der Geometrie des Crystal-Balls konnten nicht alle Winkel abgedeckt werden. So deckten die Detektoren nur einen Winkelbereich von etwa 20° - 160° zur Strahlenachse ab. Wählt man nun für m_{π^0} den Literaturwert 135 MeV und setzt $E_\gamma = E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2}$ und $\theta = 20^\circ$, dann kann man nach E_γ auflösen und erhält $E_\gamma = 114$ MeV. Das heißt, erst wenn beide Photonen eine Energie von mindestens 114 MeV besitzen, können π^0 -Mesonen erzeugt werden. Allerdings mussten auch die Intervalle von 100 bis 150 MeV verworfen werden, da hier der π^0 -Peak zu stark durch den Untergrund gestört wurde. Für Energien über 450 MeV gab es nicht mehr genug Ereignisse, wodurch diese Energieintervalle auch verworfen werden mussten. Deswegen wurden in den folgenden Betrachtungen nur Energieintervalle im Bereich von 150 MeV bis 450 MeV berücksichtigt. Um nun die Position des π^0 zu bestimmen, wurde für jedes Intervall über den Bereich von 70 MeV bis 180 MeV gefittet.

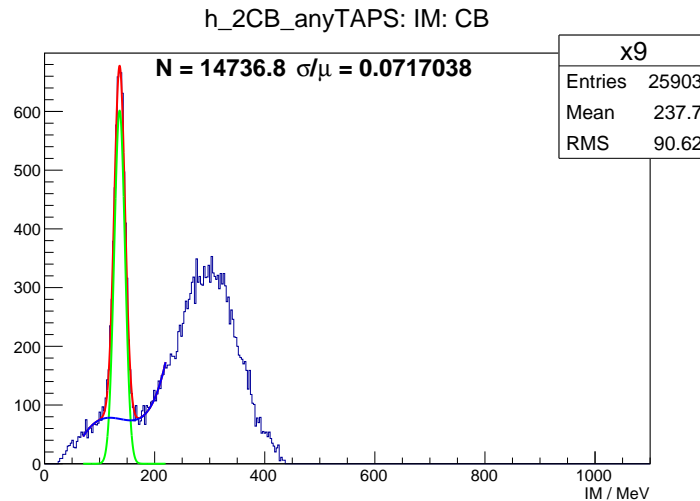


Abbildung 4.2.: Beispiel eines Fits. Es handelt sich dabei um das Energieintervall von 200 MeV bis 225 MeV. Alle Fits sind im Anhang in Abbildung A.1 zu sehen

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. Daraus konnte die Position des π^0 -Peaks abgelesen werden.

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 π^0 Peaks. Auch nahm die Abweichung für größere Energien zu und betrug teilweise über 6% (vgl. Abb.:A.2).

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

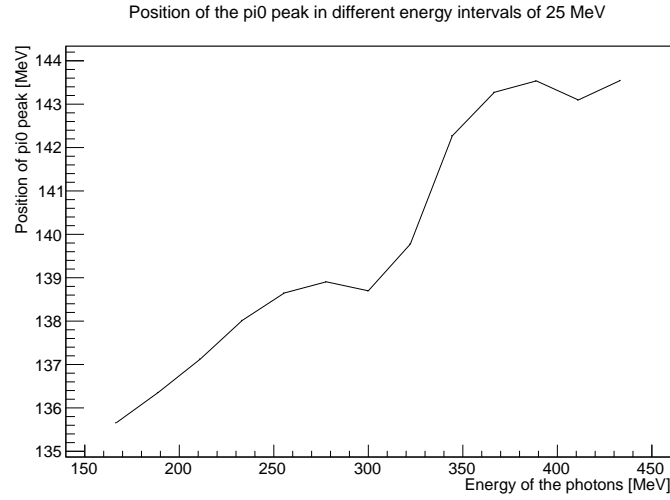


Abbildung 4.3.: Position der π^0 aus Abbildung 4.1. Die errechnete Position des π^0 Peaks wurde gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Größere Energieintervalle wurden aufgrund zu kleiner Statistik nicht berücksichtigt. Für kleinere Energien konnten keine π^0 Teilchen erzeugt werden

Daraus folgte, dass eine Abhängigkeit zwischen der Position des π^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.

4. Studien zur Kalibrierung des Crystal-Ball

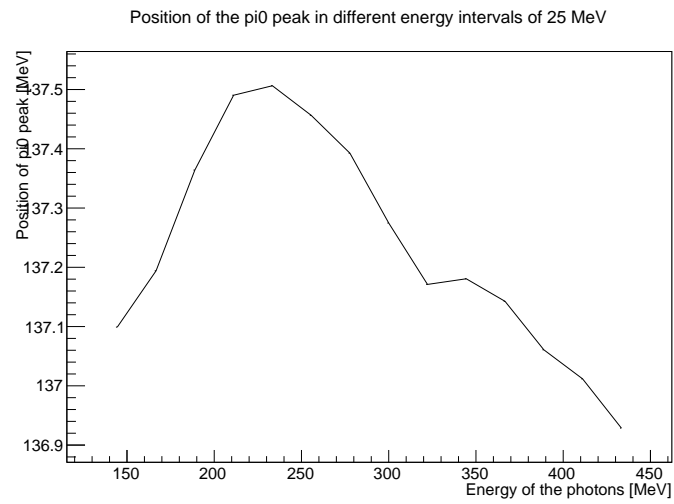


Abbildung 4.4.: Die errechneten Werte der π^0 wurden gegen die Energie der Photonen aufgetragen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In der Zusammenfassung sollten Sie in knapper Form die Aufgabenstellung und die wichtigsten Ergebnisse rekapitulieren. Es ist für die Gutachter hilfreich, wenn Sie ausdrücklich beschreiben, worin Ihre eigenen Beiträge liegen. Scheuen Sie sich auch nicht davor auszusprechen, welche Untersuchungen durch die Zeitbegrenzung der Bachelorarbeit nicht möglich waren und nutzen Sie dies als Überleitung zu einem Ausblick auf mögliche weitergehende Arbeiten an der Aufgabenstellung.

A. Anhang

A.1. Tabellen und Abbildungen

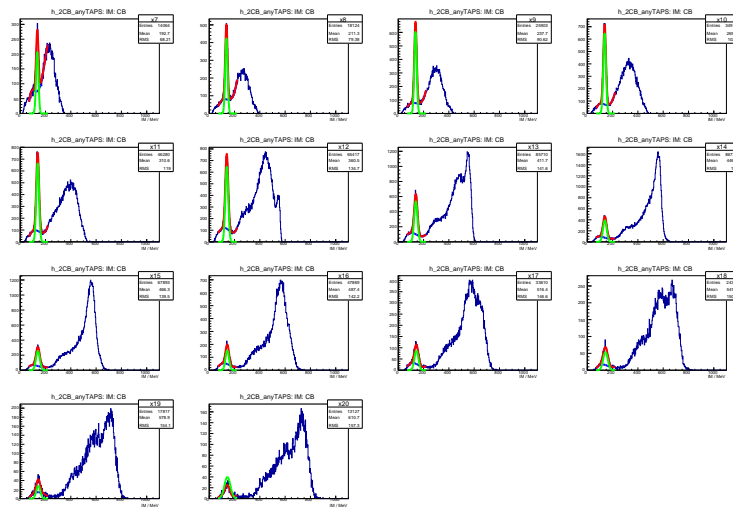


Abbildung A.1.: Alle Fits der Energieintervalle mit der Bedingung, dass sich die Photonen sich energetisch ähneln. Oben links ist wurde das Intervall 150 - 175 MeV gefittet. Das nächste ist das Intervall von 175 - 200 MeV usw.

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

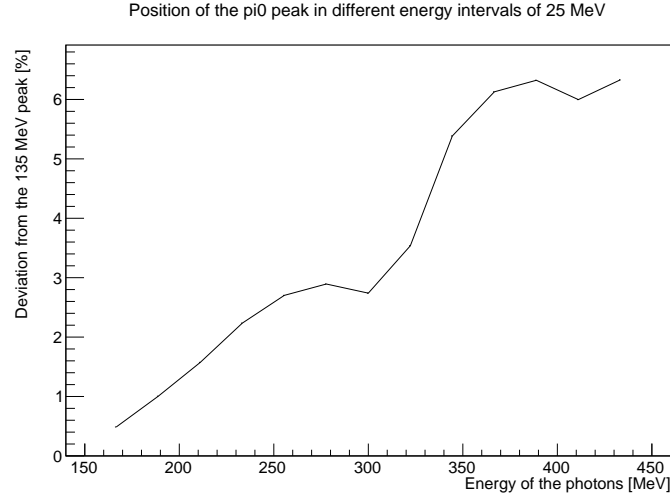


Abbildung A.2.: Die relative Abweichung des errechneten π^0 -Peaks aus Abbildung 4.1 von dem Literaturwert. Die Abweichung wurde in Prozent gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Position des π^0 Peaks wurde gegen die Energie der Photonen aufgetragen. Größere Energieintervalle wurden aufgrund zu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

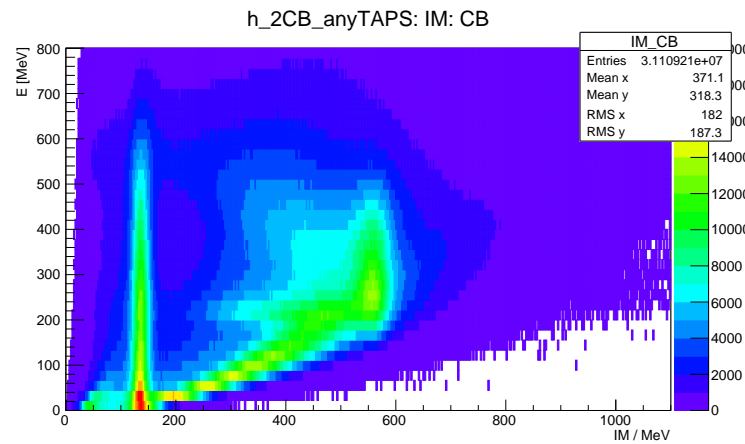


Abbildung A.3.: Zwei zweidimensionales Histogramm. Auf der x-Achse ist die errechnete invariante Masse aufgetragen, auf der y-Achse sind die Energien der Photonen. Das Histogramm wurde mit jedem Photonpaar gefüllt. Es gab also keine Einschränkung

A. Anhang

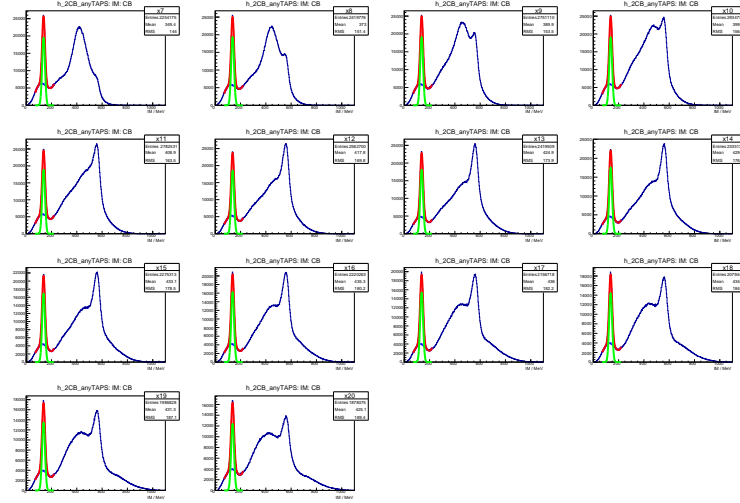


Abbildung A.4.: Alle Fits der Energieintervalle, ohne die Bedingung, dass die beiden Photonen energetisch ähnlich waren. Oben links ist das Intervall, in dem die Photonen eine Energie von 150 - 175 MeV besaßen. Das nächste Intervall ist von 175 - 200 MeV usw.

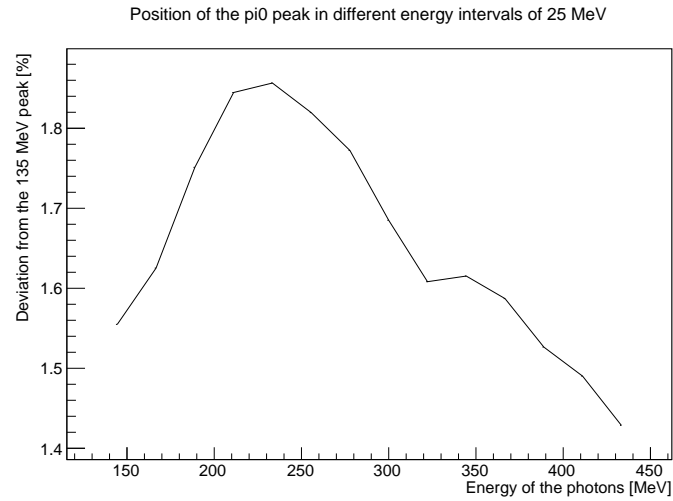


Abbildung A.5.: Die relative Abweichung der errechneten π^0 Position, ohne die Bedingung, dass die Photonen sich energetisch ähneln

B. Literaturverzeichnis

Machen Sie genaue Angaben, so dass die verwendeten Literaturstellen eindeutig identifiziert und aufgefunden werden können. Bei Lehrbüchern [?] ist es sinnvoll, den Titel anzugeben, eventuell auch die Ausgabe. Bei Artikeln in Fachzeitschriften [?] ist es üblich, nur die gebräuchlichen Abkürzungen für den Titel der Zeitschrift, Band, Erscheinungsjahr und Seite anzugeben. Unter Umständen kann es auch sinnvoll sein, im Internet aufgefundene Informationsquellen anzugeben, zum Beispiel für Software [?] oder zu den Details von Ergebnissen großer experimenteller Kollaborationen. Es ist selbstverständlich, dass Sie auch Bachelor- [1], Diplom- oder Doktorarbeiten angeben, wenn Sie diese in Ihrer eigenen Arbeit verwendet haben.

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 $\eta 3\pi^0$ 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, (Stand 06.03.2017)
- [KPh16] Internetseite der A2-Kollaboration *Reelle Photonen* Internetseite <http://www.kph.uni-mainz.de/a2.php> (Stand 11.03.2017)
- [1] B. Freund Nummer eins, Bachelorarbeit, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2012.

C. Danksagung

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