Bachelorthesis

Simulation eines neuen CBM-RICH Prototyps mit Glaslinse

Simulation of a new CBM-RICH prototype with glass lense

Zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science - Physik



vorgelegt am II. Physikalischen Institut Fachbereich 07 - Mathematik und Informatik, Physik, Geographie

Autor: Gregor Pitsch Abgabe: September 2016

| Gregor Pitsch | Autor: |
|-------------------------|-----------------|
| 4010085 | Matrikelnummer: |
| September 2016 | Abgabe: |
| Prof. Dr. Claudia Höhne | 1. Gutachter: |
| Dr. Jens Sören Lange | 2. Gutachter: |

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, die vorgelegte Thesis selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt zu haben, die ich in der Thesis angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Thesis erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der "Satzung der Justus-Liebig-Universität zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis" niedergelegt sind, eingehalten. Gemäß § 25 Abs. 6 der Allgemeinen Bestimmungen für modularisierte Studiengänge dulde ich eine Überprüfung der Thesis mittels Anti-Plagiatssoftware.

Datum, Ort

Unterschrift

1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein neuer CBM-RICH Prototyp mit Glaslinse in Simulationen implementiert und untersucht. Dieser Prototyp soll im Februar 2017 im Protonenstrahl von $1,8\frac{GeV}{c}$ Impuls am COSY Jülich eingesetzt werden und dient vor allem dem Test der neu entwickelten RICH Ausleseelektronik unter reellen Strahlbedingungen. Anders als im CBM-RICH werden in diesem Prototyp Cherenkovphotonen durch Protonen in einem Radiator aus Glas erzeugt. Der Glasradiator wird in Form einer Linse eingebaut, deren gekrümmte Fläche mit Aluminium beschichtet ist. Damit erhält man ein fokussierendes Element und kann Cherenkovringe ganz ähnlicher Eigenschaften wie im CBM-RICH erzeugen. Der RICH-Detektor ist Teil des CBM-Experiments, welches sich auf die Erforschung des QCD-Phasendiagramms konzentriert. Der RICH-Detektor soll Elektronen mithilfe von Cherenkovlicht identifizieren und diese so von den restlichen Teilchen unterscheiden, die den Detektor passieren.

In dieser Arbeit wurde das Konzept des Prototyps in CBMROOT implementiert und in Simulationen untersucht. Dabei wurde der Aufbau optimiert und an die COSY Strahlbedingungen angepasst. Die Produktion von Sekundärteilchen wurde untersucht, um den Einfluss des Prototyps auf den restlichen Testaufbau abschätzen zu können. Erwartete Hitraten für Hochratentests wurden berechnet. Die Anzahl der Hits pro Ring wurde mit realistischen Parametern berechnet und dient später zum Vergleich mit dem Experiment.

Damit ist die hier durchgeführte Arbeit ein wichtiger Baustein für einen erfolgreichen Test des neuen RICH Prototyps.

2 abstract

Within this bachelor thesis a new CBM-RICH prototype with glas lens was implemented and examined. This prototype should be used in february 2017 in the $1.8 \frac{GeV}{c}$ proton beam at COSY, Jülich and will be of use for testing the new developed RICH elite electronics within real beam conditions. Different as in the CBM-RICH in this prototype the cherenkov photons are produced by protons within a glas radiator. The glas radiator will be installed in form of a lens, whose bent surface is coated with aluminum. By that one obtains a focused element and can produce cherenkov rings with similar properties. The RICH detector is part of the CBM experiment, which concentrates on the exploration of the QCD phase diagram. The RICH detector should identify electrons with help of cherenkov light and distinguish them from other particles passing the detector.

In this thesis the concept of the prototype was implemented in CBMROOT and tested in simulations. In the process the construction was optimized and adjusted to the COSY beam conditions. The production of secondary particles was examined for estimating the influence on the remaining test construction. Expected hit rates for high rate tests were calculated. The number of hits per ring were calculated with realistic parameters and will be used later for the comparison with the experiment. Because of that the here accomplished thesis is an important building block for a successful test of the new RICH prototype.

Inhaltsverzeichnis

| 1 | Zusammenfassung | | | |
|----------|--|--|--|--|
| 2 | abstract | | | |
| 3 | Einleitung | | | |
| 4 | Theoretische Grundlagen 4.1 Standardmodell | 8 9 9 10 11 | | |
| 5 | Der CBM-RICH Prototyp mit Glaslinse 5.1 Aufbau des CBM-RICH Prototyps mit Glaslinse | 16 16 | | |
| 6 | Simulation des RICH Prototyps mit Glaslinse 6.1 CBMROOT Simulationsframework 6.2 GEANT 6.3 Fair-Box-Generator und Ascii-Generator 6.4 Implementierung der Testbox in CbmRoot 6.5 Ziele der Simulation 6.6 Geometrieanalyse und Simulationsergebnisse 6.6.1 Radius des Absorbers 6.6.2 Abstand der MAPMT-Arrays 6.6.3 Abstand der Ebene der MAPMT-Arrays und der flachen Seite der Linse d 6.7 Cherenkovringe | 22 22 22 22 22 24 24 24 25 27 31 | | |
| 7 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 39 | | |
| 8 | Literaturverzeichnis | 40 | | |

Abbildungsverzeichnis

| 1 | Teilchen/Bausteine des Standardmodells der Elementarteilchenphysik[1] | 8 |
|-----------------|--|-----|
| 2 | QCD-Phasendiagramm.[2] | 10 |
| 3 | CBM Experiment mit RICH-Detektor und Muon Chamber (Aufbau an SIS 100)[3] | 11 |
| 4 | Konzeptionelles Modell des MVD und STS[4] | 12 |
| 5 | Funktionsprinzip des RICH-Detektors[5] | 13 |
| 6 | Konzept der Myonkammer hinter dem STS (Aufbau SIS 300)[6]. | 14 |
| 7 | Konzeptioneller Aufbau des CBM-Rich Prototyps[7]. | 17 |
| 8 | Strahlengang innerhalb der Linse. Der Protonenstrahlstrahl kommt von links[8] | 17 |
| 9 | Geometrie der Glaslinse[9]. | 19 |
| 10 | Transmission des N-BK7 Borosilikatglas in Abhängigkeit der Wellenlänge bei einer Glas- dicke von 10mm (links) und Transmissionslänge l in Abhängigkeit der Wellenlänge λ (rechts) [10]. | 20 |
| 11 | Brechungsindex in Abhängigkeit der Wellenlänge, die Datenpunkte stammen vom Da- tenblatt des Glases von Edmund Optics [10]. Die Linie zeigt den Fit der Sellmeierglei- | |
| 10 | chung. | 21 |
| 12 | (rosa) und den MAPMTs (rot) | 23 |
| 13 | Strahlengang der Cherenkovphotonen (orange) innerhalb des Prototyps | 24 |
| 14 | Durchschnittliche Anzahl der Hits pro Event aufgetragen gegen den Absorberradius. | 25 |
| 15 | In der Simulation (hier 100.000 Ereignisse) verwendetes Strahlprofil des COSY Strahls (1. $8GeV, \sigma_{\pi} = \sigma_{\pi} = 0.3cm$). | 26 |
| 16 | Verteilung der Protonen innerhalb von 100.000 Events, die direkt auf die MAPMTs | |
| 10 | bei einem Abstand der MAPMT-Arrays von 3,5 <i>cm</i> und einem Abstand zwischen der | 07 |
| 17 | MAP M1-Arrays zur Glashnise $d = 2,9cm$ autrenen | 21 |
| 11 | den Histogrammen ist je der Mittelwert und die Breite des Gaußfits (σ) angegeben | 28 |
| 18 | Hits-Verteilung zehn einzelner Events somt gefitteten Ring bei $d = 2.7cm$ | 20 |
| 10 | dB-Verteilungen der in Abhildung 18 betrachteten einzelnen Ereignisse | 20 |
| $\frac{19}{20}$ | dR-Verteilungen der in Abbildung 18 betrachteten einzehnen Ereignisse. | 29 |
| | Linse Abstanden. Über den Histogrammen ist je der Mittelwert und die Breite des | 200 |
| 0.1 | Gaubits (σ) angegeben | 29 |
| 21 | dR-verteilungen bei einer Granularitat von 32x32 Pixein bei verschiedenen MAPMI- | |
| | Linse Abstanden. Über den Histogrammen ist je der Mittelwert und die Breite des | 90 |
| 00 | Gaughts (σ) angegeben | 30 |
| 22 | dR in Abnangigkeit des Abstands d für die Betrachtung von MAPM 1s mit 32x32 Pixein. | 30 |
| 23 | vertenung aller erzeugter und transmittierter Cherenkovphotonen auf den PMTs bei | 01 |
| 0.4 | | 31 |
| 24 | Verteilung der Hits auf den PM1s bei 100.000 Events. | 32 |
| 25 | Ringradien aller gentteten Ringe (100.000 Ereignisse). Über den Histogrammen ist je | ഫ |
| 00 | der Mittelwert und die Breite des Gaubits (σ) angegeben | 33 |
| 26 | Anzahl der Hits innerhalb eines gefitteten Rings (100.000 Ereignisse). Über den Histo- | 0.4 |
| ~- | grammen ist je der Mittelwert und die Breite des Gaußits (σ) angegeben | 34 |
| 27 | Geplanter Aufbau des COSY-Experiments[11]. | 34 |
| 28 | Verteilung der 1 <i>cm</i> hinter dem Prototyp registrierten Protonen bei 100.000 Events. | 35 |
| 29 | Vergrößertes Bild der Verteilung der 1 <i>cm</i> hinter dem Prototyp registrierten Protonen | |
| 0.0 | bei 100.000 Events. | 36 |
| 30 | Verteilung der 1 <i>cm</i> hinter dem Prototyp registrierten geladenen Sekundärteilchen bei | |
| | 100.000 Events | 37 |
| 31 | PDG Codes aller 1 <i>cm</i> hinter dem Prototyp registrierten Teilchen bei 100.000 Events. | 37 |
| 32 | Anzahl der verschiedenen Sekundärteilchen pro Event und deren Häufigkeit innerhalb von 100.000 Events. | 38 |

3 Einleitung

Physiker aller Welt beschäftigen sich damit, die Grundbausteine unseres Universums besser zu verstehen. Es wird ein großer Aufwand betrieben, um dieses Ziel zu erreichen. Große Beschleuniger und neu konzipierte Detektoren werden gebaut, um Effekte zu untersuchen, die unser Verständnis der Grundbausteine und der Struktur von Materie voranbringenbringen sollen.

Die Theorie des Urknalls ist die zentrale Theorie der Entstehung des Universums. Unmittelbar nach dem Urknall herrschten innerhalb dieses gewaltigen Feuerballs extrem hohe Energien, die heutzutage in der Natur nicht zu beobachten sind. Aus diesem Feuerball ging das Quark-Gluon-Plasma (QGP) hervor, ein stark wechselwirkender Materiezustand, in dem Quarks und Gluonen die relevanen Freiheitsgrade sind. Die Expansion des QGP sorgt für ein Ausfrieren des Plasmas. So kam es zu einem Phasenübergang, wodurch ein Hadronengas entstand. Der Zerfall des Hadronengas endet in stabilen Hadronen und Leptonen.

Dieser Phasenübergang aus dem QGP ins Hadronengas soll durch Schwerionenkollisionen im Experiment erzeugt und analysiert werden.

Schwerionenkollisionen werden in großen Beschleunigern erzeugt und dienen der Erforschung des QCD-Phasendiagramms. Der experimentelle Nachweis des QGP, die Charakterisierung dichter und heißer stark wechselwirkender Materie und die Suche nach den Phasenübergängen steht hier im Vordergrund. Die in den Schwerionenkollisionen entstandenen Teilchen werden mithilfe von Detektoren registriert und identifiziert. In Abhängigkeit der Kollisionsenergie und damit der Temperatur und der Baryonendichte der erzeugten Materie kann man unterschiedliche Regionen des QCD-Phasendiagrams untersuchen. Diese Materie gilt es durch geeignete Sonden zu charakterisieren. Eine sehr vielversprechende Observable ist zum Beispiel elektromagnetische Strahlung, sei es in Form von Photonen oder Di-Elektronen. Diese Sonden durchdringen die erzeugte stark wechselwirkende Materie nahezu ungehindert und lassen daher direkte Rückschlüsse auf den heißen und dichten Feuerball zu.

4 Theoretische Grundlagen

4.1 Standardmodell

Das Standardmodell ist eine Theorie der Teilchenphysik, die durch Experimente exzellent bestätigt wurde. Es beschreibt die bisher bekannten Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen zwischeneinander (siehe Abbildung 1). Sechs Sorten von Quarks (up (u), down (d), charme (c), strange (s), top (t), bottom (b)), sechs Sorten von Leptonen (Elektron (e^-), Elektron-Neutrino(ν_e), Myon(μ^-), Myon-Neutrino(ν_{μ}), Tau(τ^-), Tau-Neutrino(ν_{τ})), zwölf Sorten Austauschteilchen (Photon, Z^0 -Boson, W^+ -Boson, W^- -Boson, acht Gluonen) und das Higgs Boson stellen die Elementarteilchen dar. Die Austauschteilchen sorgen für die Wechselwirkung zwischen Quarks (starke Wechselwirkung) bzw. Leptonen (schwache Wechselwirkung). Die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung sind die Gluonen, wobei die schwache Wechselwirkung durch das Z^0 -Boson und die W-Bosonen hervorgerufen wird. Das Photon sorgt für die elektromagnetische Wechselwirkung.



Abbildung 1: Teilchen/Bausteine des Standardmodells der Elementarteilchenphysik[1].

Im Standardmodell ist die Gravitation und ihr Austauschteilchen, das Graviton, nicht berücksichtigt. Quarks sind Elementarteilchen, aus denen Hadronen, wie z.B. Protonen und Neutronen, gebildet werden. Zu den Hadronen gehören alle Teilchen, die durch die starke Wechselwirkung zusammengehalten werden. Quarks gehören zu den Fermionen (halbzahliger Spin) und sind durch ihre elektrische Ladung und ihre Familie klassifiziert. Zur ersten Familie gehören das u- und das d-Quark, zur zweiten Familie das c- und das s-Quark und zur dritten Familie gehören das t- und b-Quark. Das jeweils Erstgenannte hat eine elektrische Ladung von $q = +\frac{2}{3}e$, wobei die zweitgenannten Quarks eine elektrische Ladung von $q = -\frac{1}{3}e$ aufweisen. Alle Quarks tragen Farbladung, nehmen also an der starken Wechselwirkung teil.

Leptonen sind ebenfalls Fermionen, unterliegen jedoch der schwachen Wechselwirkung und, sofern sie eine elektrische Ladung tragen, auch der elektromagnetischen Wechselwirkung. Die Bezeichnung "Lepton" leitet sich aus dem griechischen her und steht für "leicht", im Unterschied zu den Mesonen (mittel) und Baryonen (schwer), die zu den Hadronen gehören. Die Neutrinos unter den Leptonen tragen keine elektrische Ladung, nur drei unterschiedliche Flavour (e, τ, μ) . Die restlichen Leptonen tragen abgesehen von den unterschiedlichen Flavours auch eine elektrische Ladung von q = -1e. Die Eichbosonen sind, wie es der Name schon andeutet, Bosonen (ganzzahliger Spin) und vermitteln die Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen.

Das Photon ist das Eichboson der elektromagnetischen Wechselwirkung, die acht Gluonen, die Farbladung tragen, sind Träger der starken Wechselwirkung und die W^+-, W^-- und Z-Bosonen vermitteln die schwache Wechselwirkung.

Jedes Elementarteilchen existiert, soweit bekannt, in zwei Formen, als Teilchen und Antiteilchen. Nach jetzigem Stand herrscht unter diesen zwei Formen vollständige Symmetrie, d.h. das Antiteilchen vom Antiteilchen ist wieder das Teilchen. Die Masse, die Lebensdauer, der Spin und die Art und Stärke der Wechselwirkung sind in beiden Formen gleich. Jedoch sind die elektrische Ladung, das magnetische Moment und alle ladungsähnlichen Quantenzahlen im Vorzeichen verschieden. Eine Besonderheit stellt die Parität von Teilchen und Antiteilchen dar, die im Falle der Bosonen gleich ist, jedoch bei Fermionen entgegengesetzt.

4.2 Farbladung und Confinement

Die Farbladung ist die Ladung der starken Wechselwirkung und kann drei unterschiedliche Werte annehmen mit Rot, Blau und Grün bezeichnet. Quarks tragen eine Farbladung und Gluonen eine Kombination aus Farbe und Antifarbe, die sich nicht aufhebt. Antiteilchen tragen Antifarbe.

Teilchen, die eine Farbladung aufweisen, treten nicht als freie Teilchen auf, sondern nur in Kombinationen mit anderen Teilchen, die eine Farbladung besitzen, sodass alle Farben gemischt die Farbe "Weiß" ergibt. "Weiße" Teilchen können durch Kombination einer Farbe mit ihrer Antifarbe, durch Kombination aller drei Farben und durch Kombination aller drei Antifarben gebildet werden. Die Tatsache, das Quarks nicht frei auftreten, sondern nur in Hadronen gebunden sind, wird als **Confinement** (Einsperrung) bezeichnet. Dieses Prinzip spielt in der Quantenchromodynamik (QCD) der Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung eine zentrale Rolle.

4.3 Das QCD-Phasendiagramm

Im QCD-Phasendiagramm ist die stark wechselwirkende Materie in Abhängigkeit von Temperatur T und baryochemischem Potential μ_B aufgetragen (Abbildung 2). In verschiedenen Bereichen erwartet man unterschiedliche Phasen, die sich durch unterschiedliche Freiheitsgrade auszeichnen und durch Phasenübergänge voneinander getrennt sind.



Abbildung 2: QCD-Phasendiagramm.[2]

Das QCD-Phasendiagramm soll in Experimenten vollständig untersucht werden, insbesondere die verschiedenen Phasen bei verschiedem T und unterschiedlichem μ_B . Bei niedrigem T und niedrigem μ_B spricht man von der "hadronischen Phase". Der Bereich bei mittlerem bis hohem μ_B und niedrigem T ist weitestgehend unbekannt. Insbesondere gilt es hier den Übergang aus der hadronischen Phase in weitere Phasen im Bereich des mittlerem μ_B zu finden. Bei hohem μ_B wird die sogenannte "color-flavor-locked (CFL)" Phase erwartet, die in Neutronensternen vorhanden sein könnte.

Bei höherem T und kleinerem μ_B existiert ein Phasenübergang zum Quark-Gluon-Plasma (QGP). Dies ist der Bereich der im Hinblick auf den Zustand direkt nach dem Urknall interessant ist. Bei mittlerem μ_B und moderaten T existiert ein weiterer noch unverstandener Bereich des Phasendiagramms, in dem es auch einen kritischen Punkt und Phasenübergang erster Ordnung geben könnte. Neue Phasen, wie die "Quarkyonic Matter Phase", eine Mischung aus Quarks und Hadronen, sind vorhergesagt. Das QGP ist ein Zustand der Marterie, in dem das Confinement der Quarks und Gluonen aufgehoben ist und diese als quasifreie Teilchen auftreten, was als Deconfinement bezeichnet wird. Experimentell versucht man die verschiedenen Bereiche des QCD-Phasendiagramms mithilfe von Schwerionenkollisionen zugänglich zu machen, indem man die Kollisionsenergie variiert. Der Nachweis der Phasen läuft über die Untersuchung der bei der Kollision erzeugten Teilchen. Zu analysieren ist hier beispielsweise der Druck bzw. der Druckgradient innerhalb des Feuerballs und die Bestimmung der Zustandsgleichung. Außerdem kann mithilfe von elektromagnetischen Sonden die Temperatur des Feuerballs bestimmt werden[12].

Im Bereich hoher Temperaturen und niedriger μ_B sind am LHC (Large Hadron Collider), am CERN und am RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider am Brookhaven National Laboratory Messungen sehr detaillierter und präziser Daten möglich. Im mittleren Bereich bei moderaten Temperaturen und hohem μ_B gibt es Daten aus den 80er- und 90er-Jahren, die aber viele offene Fragen zurücklassen bzgl. der Phasen, der Phasengrenzen und dem kritschen Punkt. Dahingehend gibt es neue Programme, wie z.B. das Compressed Baryonic Matter (CBM) Experiment an FAIR, welches versucht diese dichte Materie zu charakterisieren.

4.4 Das CBM-Experiment

Das Compressed Baryonic Matter Experiment an FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) in Darmstadt ist ein "Fixed Target Experiment", das Schwerionenkollisionen bei Energien von 2 - 2

11*AGeV* für Au-Ionen an SIS100 bzw. bis 35*AGeV* beim Upgrade auf SIS300 nutzt, um stark wechselwirkende Materie bei hohen Baryonendichten zu untersuchen. Damit wird das QCD-Phasendiagramm im Bereich moderaten T und moderaten μ_B untersucht, der wie oben erwähnt noch viele offene Fragestellungen hat. Die erzeugte Materie wird systematisch in Abhängigkeit der Strahlenergie untersucht, um so zu entschlüsseln, ob und wenn ja wo sich bei hohen baryochemischen Potentialen μ_B mögliche Phasengrenzen , exotische Phasen (z.B. quarkyonic phase) und ggf. ein kritischer Punkt befinden. Eine detaillierte Messung seltener Observablen wie der Di-Leptonen wird es erlauben die stark komprimierte Kernmaterie zu charakterisieren und z.B. deren Zustandsgleichung zu bestimmen.

Eine wesentliche Herausforderung des CBM Experimentes liegt darin hohe Wechselwirkungsraten (bis zu 10MHz) zu ermöglichen. Schnelle, strahlungsharte Detektoren werden zusammen mit schnellen Spurrekonstruktions- und Triggeralgorithmen erlauben, online etwa 1000 Teilchen pro Ereignis zu rekonstruieren und interessante Ereignisse zu selektieren.

4.4.1 Aufbau des CBM-Experiments

Das CBM-Experiment (Abbildung 3) besteht aus mehreren Subdetektoren: dem Mikro-Vertex-Detektor (MVD) und dem Silicon Tracking System (STS), welche sich in einem Dipolmagneten befinden, dem Ring Imaging Cherenkov (RICH)-Detektor oder der Myonkammer (Muon Chamber (MuCh)), dem Transition Radiation Detektor (TRD) und den Resistive Plate Chambers (RPC), welche Time of Flight (ToF) Messungen liefern werden. Ganz am Schluss befinden sich noch das Electromagnetic CALorimeter (ECAL) und der Projectile Spectator Detector (PSD).



Abbildung 3: CBM Experiment mit RICH-Detektor und Muon Chamber (Aufbau an SIS 100)[3]

Mikro-Vertex-Detektor

Der MVD ist ein Silizium-Pixel-Detektor aus MAPS Sensoren und befindet sich innerhalb des Dipolmagneten noch vor dem STS. Er dient der Messung der Zerfallsvertices sekundärer Hadronenzerfälle mit extrem präziser Spur- und Vertexrekonstruktion direkt nach dem Target. Er weist somit eine extrem gute räumliche Auflösung auf bei moderater Auslesegeschwindigkeit. Um das Multiple Scattering der erzeugten Teilchen zu reduzieren, befindet sich der MVD direkt hinter dem Target in einer



Vakuumkammer. Derzeit sind drei bis vier Stationen geplant (Abbildung 4).

Abbildung 4: Konzeptionelles Modell des MVD und STS[4].

Silicon Tracking System (STS)

Das STS (Abbildung 4) besteht aus acht Detektorlagen bestehend aus $300\mu m$ dicken doppelseitigen Silicon Microstrips, die mit zunehmender Entfernung vom ersten Detektor bei 30cm Entfernung vom Target bis zum letzten Detektor bei 100cm größer werden. Er dient zur Spur- und Impulsfindung, der in der Reaktion erzeugten geladenen Teilchen. Durch den Dipolmagneten wird die Bahn dieser Teilchen in Abhängigkeit des Impulses gekrümmt, sodass dieser mit 1% - 2% Genauigkeit bestimmt werden kann.

Ring Imaging Cherenkov Detektor (RICH)

Der RICH-Detektor (Abbildung 5) hat eine Länge von 2,9m und ist mit Kohlenstoffdioxid (CO_2) als Radiator gefüllt. Mithilfe des RICH-Detektors sollen Elektronen bis zu Impulsen von $8\frac{GeV}{c}$ mit-

hilfe von Cherenkovstrahlung identifiziert werden. Wenn sich Teilchen, z.B. Elektronen, mit einer Geschwindigkeit durch das Gas bewegen, die schneller ist als die Lichtgeschwindigkeit in dem Medium, so emittieren sie Cherenkovstrahlung.

Die Strahlung wird in Kegelform, d.h. mit konstantem Winkel emittiert und mithilfe eines sphärischen Spiegels auf einen Photodetektor als Ring abgebildet (Abbildung 5).



Abbildung 5: Funktionsprinzip des RICH-Detektors[5].

Aus der Berechnung des Winkels Θ ab dem die Cherenkovphotonen emittiert werden, kann die Mindestenergie (Energieschwellenwert) berechnet werden, ab der Cherenkovphotonen emittiert werden.

Es gilt:

$$\cos(\Theta) = \frac{1}{\beta n} \Rightarrow \beta > \frac{1}{n},$$

wobe
i $\beta = \frac{v}{c}$ das Verhältnis der Teilchengeschwindigkeit
 vim Vakuum und der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum darstellt und
n der Brechungsindex des Mediums in dem Cherenkovphotonen erzeugt werden sollen. Für den Brechungsindex bei Raumtemperatur (24°C) für CO₂
 n = 1,0004493 ergibt sich für β

$$\beta = \frac{1}{1,000493} = 0,999507$$

und somit für die Teilchengeschwindigkeit v

$$v = 0,999507c$$

Die Teilchengeschwindigkeit muss also nahezu Lichtgeschwindigkeit betragen, damit Cherenkovphotonen erzeugt werden können.

Für den Energieschwellenwert E der Teilchen lässt sich mit der Masse der im CBM-RICH-Detektor zu identifizierenden Elektronen $m_e = 511 \frac{keV}{c^2}$

$$E = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} m_e = 16.275, 56 keV \approx 16, 28 MeV$$

berechnen.

Muonkammer (MuCh)

Im Gegensatz zum RICH-Detektor, welcher Elektronen identifizieren soll, kann alternativ eine Myonkammer (Abbildung 6) dazu genutzt werden, Myonen zu identifizieren. Der für CBM gewählte Aufbau erlaubt es insbesondere auch Myonen niedriger Impulse selbst bei hoher Spurdichte zu identifizieren. Mithilfe eines Hadronenabsorbersystems soll eine impulsabhängige Identifizierung der Myonen durchgeführt werden. Dieses Hadronenabsorbersystem ist aus mehreren Lagen von Hadronenabsorbern (Eisenplatten mit einer Dicke von 20-100cm) aufgebaut (Abbildung 6 (gelb)), in dessen Zwischenräumen sich Triplets aus Tracking-Detektorebenen befinden. Die Myonkammer soll möglichst kompakt sein, um insbesondere $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}$ Zerfälle zu reduzieren.



Abbildung 6: Konzept der Myonkammer hinter dem STS (Aufbau SIS 300)[6].

Transition Radiation Detektor (TRD)

Auf den RICH-Detektor bzw. die Myonkammer folgt der TRD (Abbildung 3 (blauer Rahmen und graue Fläche). Er besteht aus drei Stationen (SIS300), die in zwei bis vier weitere Detektorlagen aufgeteilt sind, und ist zur weiteren Spurfindung der Teilchen, sowie der Identifikation von Elektronen und Positronen mit Impulsen $p > 1, 5 \frac{GeV}{c}$ und insbesondere zur Unterscheidung zu den Pionen, vorgesehen. Die Stationen liegen 5m, 7, 2m und 9, 5m hinter dem Target. Die gesamte aktive Detektorfläche aller Ebenen beträgt ca. $1100m^2$.

Resistive Plate Chamber (RPC)

Die RPC in Form eines Arrays dienen der Hadronenidentifikation mittels ToF-Messungen. Die aktive Fläche beträgt ca. 120m und der Detektor befindet sich etwa 10m hinter dem Target. Zu einer Kaon-Pion Separation bis zu Impulsen von $3 - 4 \frac{GeV}{c}$ ist eine Zeitauflösung von etwa 80ps nötig.

Electromagnetic Calorimeter (ECAL)

Das ECAL (Abbildung 3 mit gelbem Rahmen) ist ein klassisches Shashlik-Kalorimeter, welches aus 140 alternierenden Lagen mit 1mm Blei und 1mm Szintillator bestehen soll. Die Größen einzelner Zellen variieren von $3x3cm^2$ zu $6x6cm^2$ und $12x12cm^2$. Verschiedene Geometrien lassen Variationen

im Abstand zum Target zu, wobei momentan eine Optimierung des Layouts durchgeführt wird. Das ECAL wird nur genutzt, wenn das CBM-Experiment mit dem RICH-Detektor betrieben wird.

Projectile Spectator Detector (PSD)

Der PSD (Abbildung 3 ganz rechts (dunkelgrün)) wird genutzt, um die Kollisionszentralität sowie die Orientierung der Reaktionsebene zu bestimmen, was von hoher Wichtigkeit für die Analyse von Event-by-Event Observablen ist. Der Detektor wird nicht wechselwirkende Nukleonen eines Projektils in Nukleus-Nukleus-Kollisionen messen.

Der PSD ist ein Blei-Szintillator-Kalorimeter mit hoher Energieauflösung und besteht aus 12 x 9 unabhängigen Modulen, zu je 60 Lagen mit einer Oberfläche von 10 x 10 cm^2 .

5 Der CBM-RICH Prototyp mit Glaslinse

Die hier vorgelegte Arbeit wurde im Rahmen der RICH-Detektorentwicklung durchgeführt. Die RICH-Entwicklung ist weit fortgeschritten, der Technical Design Report (TDR) [13] wurde 2014 von FAIR akzeptiert wurde. Die Photodetektoren sind das H12700-Modell der Firma Hamamatsu. Die Elektronikentwicklung zur Auslese läuft noch, wobei gerade eine erstes Komplettsystem gebaut und im Labor getestet wird. Das System besteht aus einer elementaren Untereinheit von Arrays mit 3x2 MAPMTs, DiRich Auslesekarten, der Spannungsversorgung und einer Karte zur Sammlung und Weiterleitung der Daten.

Für einen Systemtest unter realen Strahlbedingungen sowie einen Test der Ratenfestigkeit sollen solche 3x2 Arrays in einem Teststrahl betrieben werden. Es existiert ein mehrfach am CERN-PS getesteter CBM-RICH Prototyp, in dem die neue Auslese eingebaut werden könnte. Allerdings ist dieser Prototyp eine reduzierte Version des CBM-RICH inkl. Gassystem, Spiegelwand etc. und ein Test mit großem Aufwand verbunden. Um nun die neue Elektronik zu testen soll daher ein neuer, einfacher zu handhabender Prototyp entwickelt werden, der nicht auf Cherenkovphotonen von einem Elektronstrahl angewiesen ist. Daher soll der Protonenstrahl am COSY (**Co**oler **Sy**nchroton) Jülich benutzt werden. Am COSY, Jülich steht ein Protonenstrahl mit einer Strahlenergie von zur Zeit 1,8GeV zur Verfügung. Da solche Protonenstrahlen nur an festen Radiatoren Cherenkovlicht emittieren, soll ein Prototyp mit einem festen Radiator gebaut werden. Dieser kleinere Prototyp nutzt als cherenkovlichtemittierendes und gleichzeitig fokussierendes Medium eine Linse aus Borosilikatglas. Ein ähnlicher Prototyp wurde vom LHCb-Experiment entwickelt und getestet [14].

In dieser Arbeit wurde die geplante Testbox im CBMROOT Simulationsframework implementiert und in Simulationen untersucht. Ziel der Simulationen war sowohl eine Optimierung des geometrischen Aufbaus, als auch die Bestimmung der erwarteten Hits pro Ring zum späteren Vergleich mit dem Experiment. Weiterhin wurde der Einfluss der RICH-Testbox auf folgende Detektorprototypen durch Produktion sekundärer Teilchen untersucht.

Die Ergebnisse dieser Arbeit fließen in das Layout und den Bau der Testbox ein, die im Februar 2017 an COSY getestet werden soll.

5.1 Aufbau des CBM-RICH Prototyps mit Glaslinse

Der CBM-RICH Prototyp mit Glaslinse besteht aus einer Aluminiumbox der Größe 44*cm* x 20*cm* x 30*cm*, gefüllt mit Luft, mit einer Wandstärke von 0, 3*cm*[7]. Innerhalb des Prototyps (Abbildung 7) befindet sich der eigentliche Aufbau, bestehend aus einer an der gekrümmten Seite mit Aluminium beschichteten Linse (Abbildung 7 (blau)) aus Borosilikatglas (N-BK7) der Firma **Edmund Optics**. Auf der flachen Seite wird ein runder Absorber variabler Größe aus schwarzem Silikon aufgeklebt. Der Cherenkovring wird auf zwei 3x2 MAPMT-Arrays fokussiert. Diese Arrays werden die elementaren Untereinheiten sein, die für den CBM-RICH entwickelt werden und hier getestet werden sollen.



Abbildung 7: Konzeptioneller Aufbau des CBM-Rich Prototyps[7].

In Abbildung 8 ist der Strahlengang des Cherenkovlichts samt der Glaslinse bei Durchgang eines Protons zu sehen.



Abbildung 8: Strahlengang innerhalb der Linse. Der Protonenstrahlstrahl kommt von links[8].

Um im Folgenden auf die Bauteile des CBM-RICH Prototyps einzugehen, wird das Schema des Experiments am COSY kurz erläutert.

Der COSY-Strahl, ein Protonenstrahl, trifft mit einer Strahlenergie von 1,8GeV und einer

Protonenrate von bis zu $10^6 Hz$ auf die gekrümmte Seite der Glaslinse. Es wird Cherenkovlicht erzeugt, da der Impuls der Protonen über der Impulsschwelle zur Erzeugung von Cherenkovphotonen liegt. Die emittierten Cherenkovphotonen werden an der flachen Seite der Linse totalreflektiert oder von dem Silikonabsorber, dessen Mittelpunkt sich im Mittelpunkt der flachen Seite der Linse befindet, absorbiert. Die totalreflektierten Photonen fliegen auf die sphärisch gekrümmte Seite, wo sie an der Aluminiumfläche reflektiert werden und aus der flachen Seite der Linse fokussiert austreten.

Diese Photonen sollen nun mit Photomultipliern registriert werden, die sich in der Fokalebene der Linse befinden. Durch die kegelförmige Emission der Cherenkovphotonen entsteht fokussiert ein Ring, der hier registriert werden soll.

Der Impulsschwellenwert der benötigten Strahlung lässt sich mithilfe des Brechungsindex berechnen. Der Brechungsindex der Linse liegt bei 1,489 für Wellenlängen > 2300 nm.

Es ergibt sich mit der Masse des Protons $m_p = 938, 27 \frac{MeV}{c^2}$

$$E_{Schwelle} = \gamma m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} m_p = 1266, 36 MeV \approx 1,27 GeV.$$

Damit erzeugt der Protonenstrahl bei COSY in der Glaslinse Cherenkovphotonen.

Die Glaslinse

Als Glaslinse wurde die PCX Kondensorlinse mit den in Abbildung 9 angegeben Charakterisitiken der Firma Edmund Optics verwendet. Die Glaslinse (Abbildung 9) besteht aus Borosilikatglas des Typs N-BK7. Die Zusammensetzung ist damit im Detail durch 69, 13% Siliziumdioxid (SiO_2), 10, 75% Bortrioxid (B_2O_3), 3,07% Bariumoxid (BaO), 10,4% Natriumoxid(Na_2O), 6,29% Kaliumoxid (K_2O) und 0,36% Arsentrioxid (As_2O_3) gegeben.



Abbildung 9: Geometrie der Glaslinse[9].

Wichtige Eigenschaften der Linse sind die Transmissionslänge bzw. die Transmission und der Brechungsindex in Abhängigkeit der Wellenlänge. Die Transmission P(x) und die Transmissionslänge $l(\lambda)$ stehen in folgendem Zusammenhang zueinander:

$$P(x) = e^{-\frac{x}{l}} \tag{5.1}$$

mit der Dicke des Materials x.



Abbildung 10: Transmission des N-BK7 Borosilikat
glas in Abhängigkeit der Wellenlänge bei einer Glasdicke von 10mm (links) und Transmissionslänge
l in Abhängigkeit der Wellenlänge λ (rechts) [10].

Für den Strahlentest am COSY ist nur der Bereich kleinerer Werte für die Transmissionslänge relevant, da die Glaslinse nur eine Dicke von 2, 44*cm* aufweist. Somit ist die merkwürdige Form der Kurve bei größeren Transmissionslängen irrelevant.

Der Brechungsindex in Abhängigkeit der Wellenlänge wird von Edmund Optics in einem Bereich von 290nm bis 2500nm angegeben[10]. Für die Simulation werden allerdings interpolierte Werte wie auch ein etwas kleinerer Wellenlängenbereich benötigt. Deshalb wurden die Daten mit der Sellmeiergleichung

$$n^{2}(\lambda) = 1 + \frac{B_{1}\lambda^{2}}{\lambda^{2} - C_{1}} + \frac{B_{2}\lambda^{2}}{\lambda^{2} - C_{2}} + \frac{B_{3}\lambda^{2}}{\lambda^{2} - C_{3}}$$
(5.2)

gefittet, die $n(\lambda)$ für lichtdurchlässige Medien beschreibt. B_1, B_2, B_3, C_1, C_2 und C_3 sind materialabhängige Konstanten. Für das Borosilikatglas der verwendeten Glaslinse lassen sich die Werte

$$B_{1} = 1,03961212$$
$$B_{2} = 0,231792344$$
$$B_{3} = 1,01046945$$
$$C_{1} = 6000,69867nm^{2}$$
$$C_{2} = 20017,9144nm^{2}$$
$$C_{3} = 103,560653nm^{2}$$

bestimmen (Abbildung 11). Diese Werte für $B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$ stimmen mit den Parametern des Sellmeierfits auf dem Datenblatt der Herstellerfirma **Edmund Optics** überein [10]. Der Fit beschreibt die Datenpunkte sehr gut.



Abbildung 11: Brechungsindex in Abhängigkeit der Wellenlänge, die Datenpunkte stammen vom Datenblatt des Glases von Edmund Optics [10]. Die Linie zeigt den Fit der Sellmeiergleichung.

Die aus Abbildung 10a berechnete Transmissionslänge l ist in Abbildung 10b zu sehen.

Der Absorber

Der Absorber soll die Anzahl der erzeugten Cherenkovphotonen reduzieren. Durch die Wahl seiner Größe lässt sich damit die Anzahl der registrierten Hits pro Ring einstellen. Als Absorber wird eine schwarze Silikonscheibe verwendet, die zentral auf die flache Seite der Linse geklebt wird. Die Größe des Absorbers wird im Rahmen der Simulationen bestimmt.

Photomultiplier

Nachdem die Cherenkovphotonen innerhalb der Linse erzeugt wurden und aus dieser nach zweifacher Reflexion ausgetreten sind, dienen die Photomultiplier dazu, die Photonen zu registrieren und in ein elektrisches Signal umzuwandeln.

Als PMTs wurden für den CBM-RICH bereits H12700 MAPMTs von Hamamatsu bestellt [15]. Diese bestehen aus einer quadratischen Fläche aus 8x8 Pixeln mit einer äußeren Kantenlänge der effektiven Fläche von 4,85*cm*. Wie bereits beschrieben besteht die elementare Untereinheit aus 3x2-Arrays dieser MAPMTs. Je einer dieser Blöcke wird ober- bzw. unterhalb der Strahlachse montiert, wobei der Abstand variabel eingestellt werden kann.

Im Rahmen dieser Simulationen und in Abhängigkeit der COSY Strahlparameter wird ein passender Abstand bestimmt. Ein Augenmerk liegt dabei auch auf der Anzahl der Protonen in den Ausläufern des Strahlquerschnitts, die möglicherweise die MAPMTs noch direkt durchqueren können.

6 Simulation des RICH Prototyps mit Glaslinse

Detektorsimulationen sind insbesondere bei Planung und Bau der Detektoren essentiell, um den Aufbau zu optimieren, geeignete Parameter zu wählen und eine Vorhersage über die zu messenden Werte zu treffen. Mit diesen können dann später tatsächlich gemessene Daten verglichen werden. Damit lässt sich das detaillierte Verständnis des Detektors und der Detektorantwort überprüfen.

6.1 CBMROOT Simulationsframework

In dieser Arbeit wurden die Simulationen innerhalb des CBMROOT C++-Simulationsframeworks durchgeführt. CBMROOT verknüpft verschiedene Eventgeneratoren mit GEANT und ermöglicht es, die Teilchen, die durch den Detektor fliegen, zu verfolgen.

Die simulierten Daten werden in detektornahe bzw. ähnliche Daten umgewandelt, in die an Testdaten angepasstes Wissen über Effizienzen, Auflösungen etc. einfließt. Diese Daten werden dann in Rekonstruktionsroutinen verwendet, um z.B. die Spuren der Teilchen zu rekonstruieren. Im Vergleich zu den simulierten Daten können dann Effizienzen, Akzeptanz etc. bestimmt werden.

Aus den Spuren (Tracks) der Teilchen lassen sich Informationen wie Impuls, Energieverlust und verschiedene Spurpunkte und Koordinaten gewinnen. Außerdem ist es mithilfe von CBMROOT möglich, die Trajektorien der Teilchen grafisch darzustellen.

6.2 GEANT

Ein wesentlicher Teil der Simulation ist die Berechnung der Wechselwirkung der generierten Teilchen mit Materie. Dazu dient das Programm GEANT, was speziell für den Durchflug von Teilchen durch Materie entwickelt wurde[16].

GEANT benötigt dafür genaue Kenntniss der implementierten Materialien und der Geometrie des Detektors, um eine korrekte Simulation durchzuführen.

6.3 Fair-Box-Generator und Ascii-Generator

In CBMROOT sind der Fair-Box-Generator und der Ascii-Generator Eventgeneratoren, die virtuelle Teilchen erzeugen und diese in vorgegebene Richtung in einem gewählten Impulsintervall aussenden können.

Für erste Abschätzungen wurde der Fair-Box-Generator verwendet, da die wesentlichen Strahlparameter wie Energie und Richtung einfach vorgegeben werden können. Das gaußförmige Strahlprofil wurde mit Hilfe des Ascii-Generators implementiert. Die zuvor im Fair-Box-Generator gewählten Daten für Richtung und Energieintervall wurden für den Ascii-Generator übernommen. Der so simulierte Protonenstrahl hat eine Energie von 1, 8GeV, fliegt exakt in z-Richtung und besitzt ein gaußförmiges Profil mit $\sigma_x = \sigma_y = 0, 3cm$.

6.4 Implementierung der Testbox in CbmRoot

Die Implementierung der Testbox wurde mit dem TGEOMANAGER vorgenommen. Das Zentrum der Box liegt auf den Ursprungskoordinaten (0|0|0), wobei die Flugrichtung der Teilchen konventionell in Richtung der z-Achse festgelegt ist. Für die Erstellung des Boxvolumen, wurde mithilfe des vorimplementierten TGEOVOLUME eine Box erstellt. Die Box ist mit der langen Seite (44*cm*) entlang der z-Achse ausgerichtet. Die Höhe der Testbox (30*cm*) entspricht der y-Richtung. Innerhalb der Simulation besteht die Box vollständig aus Stickstoff, das entspricht in etwa der Luft später im Experiment. Die Glaslinse (Abbildung 12 (gelb)) befindet sich mit ihrem Zentrum auf den Ursprungskoordinaten und ist aus einer Halbkugel und einer Box als zusammengesetztes Volumen (TGEOCOMPOSITESHAPE) erstellt und implementiert worden. Sie besteht aus dem Medium des Borosilikatglases N-BK7, welches innerhalb des Media-Files **media.geo** implementiert wurde. Die Beschichtung der Linse ist innerhalb der Simulation als ein reflektierendes Glas implementiert. Zu finden ist das Medium in **media.geo** als **RICHglass**. Das Volumen der Beschichtung wurde ebenfalls mit TGEOCOMPOSITESHAPE erstellt, allerdings mithilfe einer Kugelschale mit der Dicke der Beschichtung und der gleichen Box, die zur Implementierung der Glaslinse verwendet wurde. Alle Medien, in denen Photonen erzeugt oder simuliert werden sollen, sind mit den nötigen optischen Eigenschaften wie Brechungsindex $n(\lambda)$, Reflektivität etc. implementiert (siehe Abschnit "Glaslinse").

Der Absorber (Abbildung 12 (rosa)) ist innerhalb der Simulation aus einem optisch inaktiven Medium gemacht, d.h. er weist keine optischen Eigenschaften auf. Als Medium wurde aus **media.geo alumi-nium** verwendet. Die MAPMT-Arrays sind in der Implementierung auf das entscheidende Photonen detektierende Medium reduziert, dies ist historisch bedingt Cäsium-Iodid. Die einzelnen MAPMTs bis zum Pixel sind als Cäsium-Iodid Boxen implementiert und detektieren jedes auftreffende Photon. Die genauen H12700 Effizienzen sind in der Rekonstruktion als Detektorantwort implementiert, wobei der "Crosstalk" nicht berücksichtigt wurde.

Die MAPMT-Arrays befinden sich in variablen Abstand zur flachen Seite der Glaslinse.

Die anfänglichen Werte, die für die Bestimmung der Absorbergröße verwendet wurden, sind zumal der für die Glaslinse angegebene Fokus auf 3*cm* Entfernung von der Glaslinse und der Abstand der MAPMT-Arrays von 0, 1*cm*.

Nachdem die Absorbergröße bestimmt wurde, wurde der MAPMT-Abstand in Abhängigkeit des Durchmessers des Protonenstrahls auf 3, 5cm erhöht, damit die MAPMTs von keinen Protonen durchquert werden. Außerdem muss beachtet werden, dass die MAPMTs eine Kantenlänge der effektiven Fläche von 48,5mm haben. Somit muss zusätzlich der Anteil effektive Fläche der MAPMTs berücksichtigt werden, die bei 87% liegt. Somit wurde ein zusätzlicher Rand der MAPMTs von 1,75mm implementiert.



Abbildung 12: Implementierter innerer Aufbau des Prototyps mit der Glaslinse (gelb), dem Absorber (rosa) und den MAPMTs (rot).

Abbildung 13 zeigt den Strahlengang der Cherenkovphotonen innerhalb des implementierten Aufbaus.



Abbildung 13: Strahlengang der Cherenkovphotonen (orange) innerhalb des Prototyps.

6.5 Ziele der Simulation

Im Rahmen dieser Simulation soll getestet werden, mit welcher Geometrie des CBM-RICH Prototypen die gewünschten Ergebnisse zu erzielen sind. Im Besonderen sind scharfe Cherenkovringe beabsichtigt, die den Ringen aus dem späteren RICH-Detektor ähneln. D.h. die Anzahl der Hits pro Ring soll relativ zum Umfang ähnlich sein. Dazu muss der Aufbau optimiert werden: Die Absorbergröße, der Abstand der MAPMT-Arrays zueinander und zu der Glaslinse.

Bezogen auf das COSY Experiment sind ebenfalls die Sekundärteilchen von Bedeutung, die die Box verlassen. Die Anzahl dieser Teilchen soll gering gehalten werden, um nachfolgende Detektoren nicht zu beeinträchtigen.

6.6 Geometrieanalyse und Simulationsergebnisse

Innerhalb der Geometrieanalyse soll der genaue Aufbau der Box bestimmt werden, um möglichst optimale Simulationsergebnisse zu erhalten.

6.6.1 Radius des Absorbers

Die Anzahl der Hits pro Ring wurde in Abhängigkeit vom Absorberradius gemessen und ist in Abbildung 14 dargestellt. Diese Simulationen wurden wie oben beschrieben mit einem Abstand der MAPMTs zur Linse von 3*cm* und einem Abstand von 0, 1*cm* zwischen den MAPMT-Arrays durchgeführt. Wie erwartet sinkt die Anzahl der Hits mit zunehmender Größe des Absorbers. Die Abhängigkeit ist in etwa linear und kann in guter Näherung durch

$$Hits = a - b \cdot r$$

beschrieben werden.



Abbildung 14: Durchschnittliche Anzahl der Hits pro Event aufgetragen gegen den Absorberradius.

Die Werte a und b wurden zu a = 65,782 und b = 26,477 gefittet. Aus dieser Simulation wurde der Absorberradius zu 1,6cm bestimmt, da sich der Radius und die Anzahl der Hits pro Cherenkovring ähneln.

6.6.2 Abstand der MAPMT-Arrays

Da der Protonenstrahl ein etwa gaußförmiges Profil aufweist, muss zwischen den MAPMTs genügend Abstand liegen, damit die Elektronik und die MAPMTs nicht durch direkt auftreffende Protonen beschädigt werden.

Die Breite des COSY Strahlprofils ist bei 1,8GeV etwa $\sigma_x=\sigma_y=0,3cm.$ Abbildung 15 zeigt das Strahlprofil8cmvor der Box.



Abbildung 15: In der Simulation (hier 100.000 Ereignisse) verwendetes Strahlprofil des COSY Strahls $(1, 8GeV, \sigma_x = \sigma_y = 0, 3cm)$.

Nach Möglichkeit sollen keine direkten Protonen in die MAPMTs und die Elektronik gelangen, da sonst insbesondere die MAPMTs Schaden nehmen können. Um dies zu verhindern muss genügend Abstand zwischen den MAPMTs gewählt werden.

Bei Betrachtung der Verteilung des Protonenstrahls kann durch das Intervall auf der y-Achse, in dem sich der Großteil der Startpunkte befindet, ein Abstand der MAPMT-Arrays von **3,5cm** abgeschätzt werden. Dieser Abstand hat zufolge, dass innerhalb von 10.000 Events ein Proton die PMTs durchdringt, was zunächst keine größeren Probleme während des Experiments erwarten lässt. Für die im folgenden optimierten Parameter durchdringen innerhalb 100.000 Events sechs Protonen die MAPMT-Arrays (Abbildung 16). Als statistischer Fehler ist hier die Wurzel der Anzahl der durchdringenden Protonen $\pm\sqrt{6}$ anzugeben.



Abbildung 16: Verteilung der Protonen innerhalb von 100.000 Events, die direkt auf die MAPMTs bei einem Abstand der MAPMT-Arrays von 3, 5cm und einem Abstand zwischen der MAPMT-Arrays zur Glaslinse d = 2, 9cm auftreffen.

6.6.3 Abstand der Ebene der MAPMT-Arrays und der flachen Seite der Linse d

Im Experiment ist ein scharfer fokussierter Cherenkovring beabsichtigt. Daher wird der Abstand der MAPMT-Ebene zur flachen Seite der Linse d in den Simulationen variiert und der abgebildete Ring untersucht. Die Größe, mit der die Ringstärke, d.h. die Fokussierung gemessen wird, ist der Abstand der einzelnen Hits zum gefitteten Ring **d** \mathbf{R}

$$dR = R - \sqrt{(cX - hitX)^2 + (cY - hitY)^2},$$

wobei cX und cY die x- und y-Koordinaten des Ringzentrums und hitX und hitY die x- und y-Koordinaten des Hits sind. Der Wert für dR sollte um 0 verteilt sein und die Breite der Verteilung $\sigma(dR)$ gibt die Schärfe des Rings an. Damit lässt sich mit $\sigma(dR)$ die Fokussierung überprüfen. Dazu wird $\sigma(dR)$ in Abhängigkeit des Abstandes d bestimmt. Mithilfe dieses Wertes lässt sich eine Verteilung für verschiedene Werte für den Abstand d der Ebene der MAPMT-Matrizen zu der ebenen Seite der Linse finden.



Abbildung 17: dR-Verteilungen für d = 2, 7cm, d = 3cm und d = 3, 2cm bei 64 MAPMT-Pixel. Über den Histogrammen ist je der Mittelwert und die Breite des Gaußfits (σ) angegeben.

Wider Erwarten ist für dR in allen untersuchten Abständen eine Zwei-Peak-Struktur zu erkennen und keine Gaussverteilung (Abbildung 17).

Da nach gründlicher Fehlersuche keine Ursache gefunden werden konnte, wurden einzelne Ereignisse betrachtet. In Abbildung 18 sind zehn einzelne Ereignisse bei einem MAPMT-Linsen Abstand von d = 2,7cm gezeigt. Dieser Abstand wurde gewählt, da dort die Zwei-Peak-Struktur besonders ausgeprägt war (Abbildung 17a).



Abbildung 18: Hits-Verteilung zehn einzelner Events samt gefitteten Ring bei d = 2,7cm.

Die Hits liegen im Allgemeinen gut auf dem Ringfit.

Die einzelnen dR-Verteilungen dieser Ringe sind in Abbildung 19 gezeigt. Diese Betrachtung liefert allerdings keinen weiteren Aufschluss.



Abbildung 19: dR-Verteilungen der in Abbildung 18 betrachteten einzelnen Ereignisse.

Um die Vermutung zu testen, dass es sich um ein geometrisches Artefakt der endlichen Pixelgröße handeln könnte, wurde die Granularität der MAPMTs von 8x8 Pixeln auf 32x32 Pixel erhöht und der Abstand zwischen den einzelnen MAPMTs auf 1mm verringert, um eine idealisierte Betrachtung zu gewährleisten. Außerdem wurde ein punktförmiger Strahl verwendet. Abbildung 20 zeigt die dazugehörigen dR-Verteilungen.



Abbildung 20: dR-Verteilungen bei einer Granularität von 32x32 Pixeln bei verschiedenen MAPMT-Linse Abständen. Über den Histogrammen ist je der Mittelwert und die Breite des Gaußfits (σ) angegeben.

Die dR-Verteilungen für 32x32 Pixel auf den MAPMTs sind in besserer Näherung gaußförmig, was den vermuteten geometrischen Effekt bei geringerer Pixelzahl bestätigt. Daher wurde der Fokus nun mit einer Granularität von 32x32 Pixeln, sowie dem zuvor bestimmten Absorberradius von 1, 6cm bestimmt.

Abbildung 21 zeigt die dR-Verteilungen für die Abstände d = 2, 8cm, d = 2, 9cm und d = 3, 1cm.



Abbildung 21: dR-Verteilungen bei einer Granularität von 32x32 Pixeln bei verschiedenen MAPMT-Linse Abständen. Über den Histogrammen ist je der Mittelwert und die Breite des Gaußfits (σ) angegeben.

Für die dR-Verteilung für d=2,9cm stellt sich die kleinste Breite, d.h. der beste Fokus ein. Dieser Wert passt gut zu den erwarteten 3cm [7].



Abstand MAPMT-Array-Ebene zur Glaslinse[cm]

Abbildung 22: dR in Abhängigkeit des Abstands d
 für die Betrachtung von MAPMTs mit 32x32 Pixeln.

Abbildung 22 zeigt einen Parabelfit der bestimmten dR-Werte in Abhängigkeit des Abstands d.

Die gefittete Parabelfunktion ist

$$dR(d) = 0,0368d^2 - 0,2143d + 0,4034.$$

6.7 Cherenkovringe

Im folgenden werden für 100.000 Events, die entstandenen Ringe analysiert. Bei einer Strahlintensität von $10^4 \frac{Protonen}{s}$ sind die gezeigten Ergebnisse bereits in zehn Sekunden Messzeit zu erzielen.

Verteilung aller Cherenkovphotonen



Abbildung 23: Verteilung aller erzeugter und transmittierter Cherenkovphotonen auf den PMTs bei 100.000 Events.

Der optimierte Testaufbau zeigt sich hier, wie in der Geometrieanalyse beabsichtigt, in einem scharfen Cherenkovring.

Die weißen Linien im Histogramm stellen die nicht-sensitiven Teile sowie die Lücken zwischen den einzelnen MAPMT-Einheiten von insgesamt 4,5mm dar, in denen keine Photonen registriert werden können.



Abbildung 24: Verteilung der Hits auf den PMTs bei 100.000 Events.

Abbildung 24 zeigt die Verteilung der Hits bei 100.000 Events. In dieser Zahl und Darstellung sind alle MAPMT spezifischen Details wie Quanteneffizienz und Pixelgeometrie berücksichtigt bis auf den "Crosstalk". Die einzelnen Pixel sind in der Verteilung deutlich zu erkennen.

Aus Abbildung 24 lässt sich auch die erwartete Rate an Signalen ablesen. Bei einer Strahlintensität von 10⁵ $\frac{Protonen}{s}$ registrieren einzelne Pixel Raten von bis zu $4 \cdot 10^4 \frac{Signalen}{s}$, d.h. 40kHz.

Ringradius

Eine charakterisierende Größe des Rings ist der Radius. Im RICH-Detektor liegt der Radius etwa bei 4, 5cm. Aus dem gefitteten Ring lässt sich mithilfe der Rekonstruktionssoftware auch der Radius bestimmen.



Abbildung 25: Ringradien aller gefitteten Ringe (100.000 Ereignisse). Über den Histogrammen ist je der Mittelwert und die Breite des Gaußfits (σ) angegeben

Abbildung 25 zeigt die Verteilung der Radien aller Events. Die Radien lassen sich mithilfe der Rekonstruktionssoftware aus dem Ringfit gewinnen. Im Mittel liegt der Radius hier bei 5,44*cm*. Im Vergleich zum vollständigen CBM-RICH ist der Radius hier etwa 1*cm* größer. Die Ähnlichkeit der Ringe ist ein schöner Nebeneffekt des Aufbaus mit der gewählten Linse.

Anzahl der Hits innerhalb eines Rings

Mithilfe des Ringfits lässt sich ebenfalls die Anzahl der Hits pro Ring ermitteln. Da jedes Event nur ein Proton enthält, entsteht nur ein Cherenkovring. Das bedeutet, innerhalb der Simulation sind die Anzahl aller Hits und der Hits pro Ring in etwa gleich.



Abbildung 26: Anzahl der Hits innerhalb eines gefitteten Rings (100.000 Ereignisse). Über den Histogrammen ist je der Mittelwert und die Breite des Gaußfits (σ) angegeben.

Abbildung 26 zeigt die Verteilung der Hits pro Ring aller einzelnen Events, im Mittel hat jeder Ring 19,72 Hits. Der beabsichtigte Bereich der Hits pro Ring liegt bei etwa 20 - 25, da im CBM-RICH etwas über 20 Hits pro Ring erwartet werden. Mit der hier simulierten Anzahl von Hits liegt der Prototyp damit in einem ähnlichen Bereich und gibt ein realistisches Abbild der erwarteten Situation. Es fallen nicht alle Hits innerhalb eines Events in diese Statistik. Typischerweise wird ca. ein Hit nicht im Ringfit berücksichtigt.

Betrachtung der hinter dem CBM-RICH Prototyp austretenden Teilchen

Beim CBM Testaufbau (Abbildung 27) am COSY Jülich sollen mehrere Detektoren hintereinander getestet werden.



Abbildung 27: Geplanter Aufbau des COSY-Experiments[11].

Hinter **ref2** in Strahlrichtung steht Raum für weitere zu testende Detektoren wie den RICH-Prototyp zur Verfügung.

Es wurden die durch die Testbox produzierten Sekundärteilchen sowie die Aufstreuung des Protonenstrahls untersucht. Diese Informationen sind wichtig für die der RICH-Testbox folgenden Detektorprototypen.



Abbildung 28: Verteilung der 1cm hinter dem Prototyp registrierten **Protonen** bei 100.000 Events.

Der Großteil der Protonen geht ungehindert durch die gesamte Box, sodass auch nach dem RICH-Prototyp das Strahlprofil gaußförmig mit $\sigma_x = \sigma_y = 0, 3cm$ ist. Einige Protonen werden allerdings stärker gestreut (Abbildung 28).

Abbildung 29 zeigt die Vergrößerung um den Mittelpunkt aus Abbildung 28, um diesen Bereich mit dem anfänglichem Protonenstrahl zu vergleichen.



Abbildung 29: Vergrößertes Bild der Verteilung der 1cm hinter dem Prototyp registrierten **Protonen** bei 100.000 Events.

Ein deutliches Aufstreuen ist zu erkennen.

Zum Teil finden auch Wechselwirkungen statt und Sekundärteilchen entstehen. Deren Verteilung hinter der RICH-Testbox ist in Abbildung 30 zu sehen.



Abbildung 30: Verteilung der 1cm hinter dem Prototyp registrierten geladenen Sekundärteilchen bei 100.000 Events.

Die Sekundärteilchen sind breit um die Strahlachse verteilt.

Die Art der Teilchen lässt sich mit der Rekonstruktionssoftware unter Nutzung der PDG (Particle Data Group) Codes bestimmen (Abbildung 31).



Abbildung 31: PDG Codes aller 1cm hinter dem Prototyp registrierten Teilchen bei 100.000 Events.

Das Histogramm der PDG Codes (Abbildung 31) zeigt zum einen, dass mit großer Wahrscheinlichkeit alle Protonen den Prototyp passieren. Zusätzlich werden in etwa 0,5% bis 1% der Ereignisse Pionen oder Elektronen erzeugt. Die genauen Zahlen sind in Abbildung 32 ablesbar. In etwa 1,3% der Ereignisse wird zusätzlich ein π^+ , in ca. 0,6% der Ereignisse ein π^- erzeugt. Zusätzliche Elektronen oder Positronen treten in etwa 0,5% der Fälle auf, μ^- oder μ^+ nur im Sub-Promille-Bereich



Abbildung 32: Anzahl der verschiedenen Sekundärteilchen pro Event und deren Häufigkeit innerhalb von 100.000 Events.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der hier vorgelegten Arbeit wurde eine neue CBM-RICH Testbox mit Glaslinse in CBMROOT implementiert und simuliert.

Die Simulationen zeigen, dass das Prototyp Konzept hervorragend funktionieren sollte, so dass damit die weiteren Tests der Datenauslesekette mit deutlich geringerem Aufwand als zuvor durchgeführt werden können.

In den Simulationen wurden die noch offenen geometrischen Parameter wie folgt ermittelt: Absorberradius 1, 6*cm*, Abstand der MAPMT-Arrays zur Linse 2, 9*cm* und der Abstand der MAPMT-Arrays zueinander 3, 5*cm*.

Mit diesem Aufbau werden Cherenkovringe auf die Photomultiplier projeziert, die den im CBM-RICH Erwarteten stark ähneln (Tabelle 1). Die neue Auslesekette kann damit unter realen Bedingungen getestet werden.

| | Dieser CBM-RICH Prototyp | CBM-RICH Detektor |
|---------------|--------------------------|-------------------|
| Hits pro Ring | ≈ 20 | ≈ 20 |
| Ringradius | $\approx 5,44cm$ | $\approx 4,5cm$ |

Tabelle 1: Hits pro Ring und Ringradius des CBM-RICH Prototyps und des CBM-RICH Detektors im Vergleich.

In den Simulationen sind alle bekannten Materialparameter implementiert. Die projezierten Ringe können mit dem standardmäßig verwendeten idealen Ringfinder in CBMROOT rekonstruiert werden. Neue Reflektionsmessungen der bereits für den Teststrahl vorbereiteten Glaslinse an der Universität Wuppertal zeigen, dass die Reflektivität der Aluminiumschicht auf der Glaslinse nur bei etwa 58% statt bei den angenommen 87% liegt. Die Anzahl der Hits pro Ring ist also ggf. um den Faktor $\frac{2}{3}$ zu skalieren, bzw. ein kleinerer Absorber zu verwenden.

Neben dem geometrischen Aufbau und den allgemeinen Ringparametern wurden auch andere Aspekte des Prototyp Betriebs in den Simulation untersucht.

Da der Protonenstrahl an COSY ein Strahlprofil von etwa 3mm Breite hat, wurde untersucht, wie viele Protonen noch direkt Photomultiplier und Ausleseelektronik durchdringen. Bei den angenommenen Parametern wären es sechs Protonen aus 100.000 Ereignissen, d.h. etwa 0,006%. Ein Vorteil dieses Testaufbaus ist, dass Photomultiplier und Ausleseelektronik auch Hochratentests unterzogen werden können. Im CBM-Experiment werden in einzelnen Bereichen Raten von bis zu 700 $\frac{kHz}{Pixel}$ erwartet. Im Cosy Teststrahl wären dafür Strahlintensitäten von 1,75 $\cdot 10^6 \frac{Protonen}{s}$ nötig, was durchaus möglich ist.

Insgesamt sind die hier vorgelegten Simulationen ein wichtiger Baustein für einen erfolgreichen Betrieb des neuen Prototyps an COSY, Jülich, im Februar 2017.

8 Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] https://cbm-wiki.gsi.de/foswiki/pub/Rich/CbmRichMeeting100615/talkcp_lhcb.pdf. Stand: 20/07/2016.
- [2] http://www.teilchen.at/images/b460/QCD_Phasendiagramm.jpg. Stand: 20/07/2016.
- [3] http://cbm.uni-muenster.de/links/more/CBM_SIS100.png. Stand: 20/07/2016.
- [4] https://cbm-wiki.gsi.de/foswiki/pub/Public/PublicSts/sts_przekroj.gif. Stand: 20/07/2016.
- [5] http://repository.gsi.de/record/65526/files/TDR-CBM-RICH.pdf. Stand: 20/07/2016.
- [6] https://sites.google.com/site/kalyandeygu/_/rsrc/1414058625165/research-1/ design_sis300.png?height=250&width=400. Stand: 20/07/2016.
- [7] Dennis Pfeifer. "Status of the Testbox for the Beamtime at COSY and the Storage Box for the MAPMTs". Bergische Universität Wuppertal, CBM Kollaborationstreffen April 2016.
- [8] http://cdn.phys.org/newman/gfx/news/2015/particlephys.png. Stand: 02/09/2016.
- [9] http://www.edmundoptics.com/images/catalog/2909_PCX.gif. Stand: 20/07/2016.
- [10] http://www.amus.de/files/schott_datasheet_n-bk7.pdf. Stand: 20/07/2016.
- [11] Christian Pauly. "Beamtime planing". Bergische Universität Wuppertal, CBM Kollaborationstreffen April 2016.
- [12] Bengt Friman et al. "The CBM Physics Book: Compressed Baryonic Matter in Laboratory Experiments". Lecture Notes in Physics, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [13] http://repository.gsi.de/record/65526/files/TDR-CBM-RICH.pdf. Stand: 02/09/2016.
- [14] https://cbm-wiki.gsi.de/foswiki/pub/Rich/CbmRichMeeting100615/talkcp_lhcb.pdf. Stand: 01/09/2016.
- [15] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H12700_TPMH1348E.pdf. Stand: 19/09/2016.
- [16] http://consult.cern.ch/writeups/geant/. Stand: 19/09/2016.