

Tests des Aerogel-Čerenkov-Detektors für das BGO-OD Experiment

Jan Glowacz

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Februar 2019

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

Bonn,
Datum

.....
Unterschrift

1. Gutachter: Prof. Dr. Hartmut Schmieden
2. Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Ketzer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das BGO-OD-Experiment	3
2.1	Das Experiment	3
2.1.1	Elektronen-Stretcher Anlage ELSA	4
2.1.2	Strahlerzeugung	4
2.1.3	BGO-Ball	4
2.1.4	Vorwärtsspektrometer	5
2.2	Probleme des Vorwärtsspektrometers	5
3	Prinzip des Čerenkov-Detektors	7
3.1	Der Čerenkov-Effekt	7
3.2	Aerogel	8
3.3	Photomultiplier	9
4	Der Aerogel-Čerenkov-Detektor	11
4.1	Aufbau	11
4.2	Aktueller Status	12
5	Ergebnisse der Strahltests	13
5.1	Durchgeführte Messungen	13
5.2	Auswertung	14
5.2.1	Verarbeitung einzelner Signale	14
5.2.2	Bestimmung der Multiplizitäten	15
5.2.3	Bestimmung des vom Detektors abgedeckten Bereichs	19
5.2.4	Bestimmung der Detektor-Präzision und Detektionsrate	21
5.3	Ergebnisse	24
6	Zusammenfassung	27
	Literatur	29
	Histogramme	33
	Tabellen	35
	Abbildungsverzeichnis	37

Tabellenverzeichnis	39
Danksagungen	41

Einleitung

Die Physik beschreibt mithilfe von Modellen die grundlegenden Phänomene der Natur. Dabei befasst sich speziell die Teilchenphysik mit den fundamentalen Bausteinen unserer Welt. Zur Beschreibung dieser Bausteine wird das Standardmodell verwendet, das die Elementarteilchen und Wechselwirkungen zusammenfasst. Die von diesem Modell beschriebenen aus Quarks bestehenden Hadronen können in angeregte Zustände gebracht werden sowie Bindungen miteinander eingehen.

Um diese Vorgänge zu untersuchen wird am BGO-OD-Experiment des Physikalischen Instituts der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn die Photoproduktion von Mesonen angewandt. Dabei treffen Photonen mit Energien von einigen GeV auf ein ruhendes Target aus Wasserstoff oder Deuterium. Die Eigenschaften der entstehenden Reaktionsprodukte werden in verschiedenen Detektoren bestimmt und es werden daraus die zwischenzeitlich existierenden Teilchenzustände rekonstruiert.

Bei dem BGO-OD-Experiment wird eine Vielzahl verschiedener Hadronen mit hoher kinetischer Energie erzeugt. Die bisherigen Möglichkeiten des Experiments, die erzeugten Hadronen eindeutig zu identifizieren, stoßen speziell bei Teilchen mit kleinen und ähnlichen Massen, wie Pionen und Kaonen, an ihre Grenzen. Um eine bessere Identifizierung der Teilchen zu ermöglichen, wurde ein Aerogel-Čerenkov-Detektor von Stefan Materne am Physikalischen Institut der Universität Bonn konzipiert und gebaut. Diese Bachelorarbeit untersucht die prinzipielle Funktion dieses Detektors im BGO-OD-Experiment.

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird das BGO-OD-Experiment, die Verwendung des Aerogel-Čerenkov-Detektors in diesem Experiment und das Funktionsprinzip und der Aufbau des Aerogel-Čerenkov-Detektors dargestellt. Nach einer Beschreibung der durchgeführten Messungen werden diese analysiert und diskutiert.

Das BGO-OD-Experiment

2.1 Das Experiment

Das BGO-OD (Bismuth Germanate Oxide - Open Dipole) Experiment ist eines von mehreren Experimenten an der ELSA-Beschleunigeranlage des Physikalischen Instituts der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn. Der Aufbau des Experiments ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

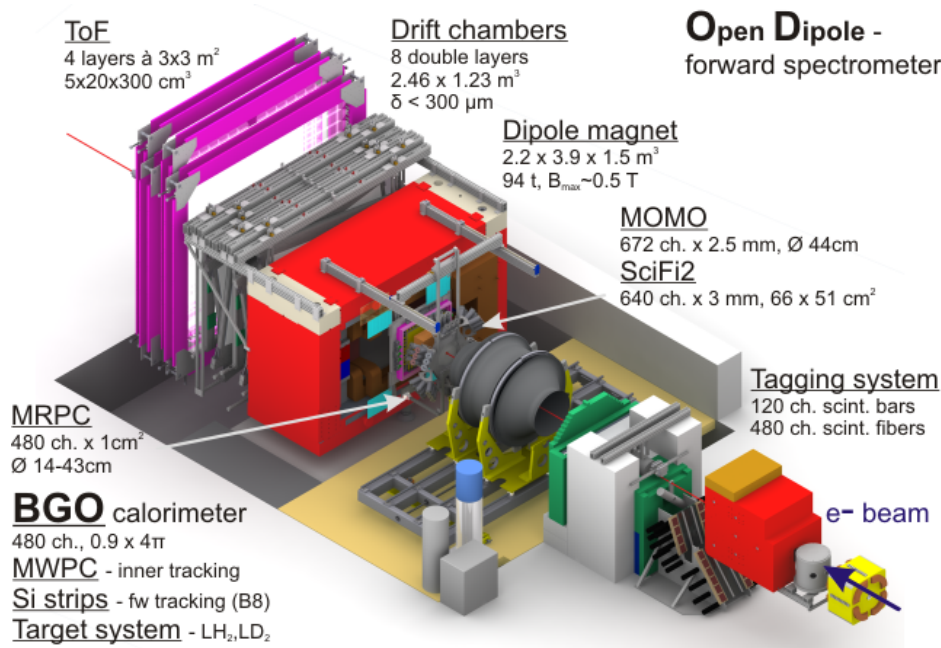


Abbildung 2.1: Aufbau des BGO-OD Experiments

Das Ziel des BGO-OD Experiments ist es, die Nukleonenstruktur mittels Meson-Photoproduktion zu erforschen. Speziell werden Zustände mit Seltsamen und Vektor-Mesonen untersucht. Das Experiment ist als Fixed-Target Experiment konstruiert, bei dem Target handelt es sich entweder um Wasserstoff oder um Deuterium.

2.1.1 Elektronen-Stretcher Anlage ELSA

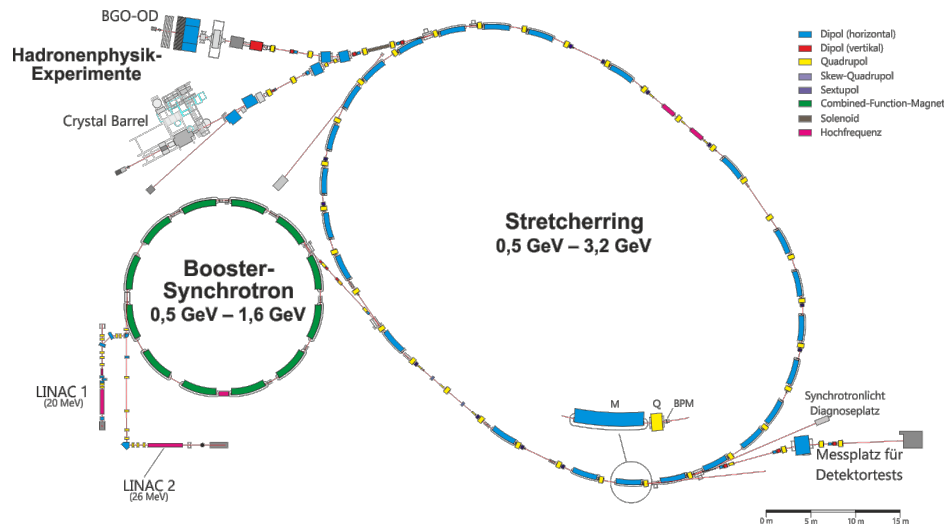


Abbildung 2.2: Aufbau der Elektronen-Stretcher-Anlage [1]

Zur Erzeugung der hochenergetischen Photonen für das BGO-OD Experiment wird der Elektronenstrahl der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA genutzt. In dieser werden Elektronen in drei Stufen auf Energien von bis zu 3,2 GeV beschleunigt (siehe Abbildung 2.2). Die erste Stufe besteht aus einem von 2 Linearbeschleunigern (LINAC 1 und LINAC 2) mit jeweils eigener Elektronenerzeugung. Die Elektronen werden dann in der zweiten Stufe, dem Booster-Synchrotron in Paketen weiter beschleunigt und in die dritte Stufe, den Stretcherring gefüllt. Sobald sich genügend Elektronen in diesem Ring befinden, werden sie auf die Endenergie von bis zu 3,2 GeV beschleunigt. Dann können sie über einen längeren Zeitraum als kontinuierlicher Elektronenstrahl an die Experimente abgegeben werden.

2.1.2 Strahlerzeugung

Die für die Mesonen-Photoproduktion verwendeten Photonen werden aus dem Elektronenstrahl der ELSA durch Kollision mit einem Radiator als Bremsstrahlung erzeugt. Um sowohl polarisierte als auch nicht-polarisierte Photonen erzeugen zu können, werden verschiedene Radiatoren verwendet. Die Radiatoren befinden sich dabei in einer Vakuumkammer. Mithilfe einer Taggeranlage werden durch Ablenkung in einem Magnetfeld die verbleibenden Energien der Elektronen bestimmt. Daraus lässt sich dann die Energie der Photonen ermitteln.

Treffen die Photonen auf die Protonen oder Neutronen des Targets entstehen Reaktionsprodukte wie Hadronen, Mesonen, Leptonen und Photonen.

2.1.3 BGO-Ball

Um das Target herum ist die erste Gruppe von Detektoren angebracht. Diese sind ein Ball aus Bismuthgermanat-Szintillatorkristallen, ein Barrel aus Plastikszintillatoren, eine Multi-Wire-Proportional-Chamber und ein weiterer Plastikszintillator als Endring. Diese Detektoren bestimmen die Eigenschaften aller Teilchen, die in einem Winkel von 10° bis 155° vom Strahl wegfliegen.

2.1.4 Vorwärtsspektrometer

Die zweite Gruppe von Detektoren folgt hinter dem Target und deckt den Winkelbereich von 10° um den Strahl ab. Zwei Szintillatordetektoren bestimmen zunächst die ursprüngliche Flugbahn der Teilchen. Die Teilchen werden dann im Feld des Offenen Dipol Magneten (OD) abgelenkt und ihre weiteren Bahnen mithilfe von Driftkammern und einem Time-of-Flight Detektor verfolgt. Aus der Krümmung der Bahn lassen sich nun wieder die Eigenschaften der Teilchen ermitteln.

2.2 Probleme des Vorwärtsspektrometers

Für das BGO-OD Experiment ist es wichtig, die Eigenschaften von vielen Teilchen in einem engen Winkelbereich ($< 10^\circ$) um den Strahl herum eindeutig und präzise zu bestimmen. Die in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Detektoren bestimmen den Impuls der Teilchen aus der Krümmung der Flugbahn und die Geschwindigkeit aus der zur Zurücklegung von Strecke benötigten Zeit. Leichte Teilchen wie Pionen und Kaonen mit Massen von 139,6 MeV und 493,7 MeV haben bereits bei Energien von 1,5 GeV praktisch dieselbe Geschwindigkeit von $\beta_\pi = 0,996$ und $\beta_K = 0,944$. Bei dieser Geschwindigkeit benötigen sie nur 13 bis 14 ns, um das ca. 4 m lange Vorwärtsspektrometer zu durchqueren. Speziell ist der unterschied in den Flugzeiten unter 1 ns groß und die Abstände zwischen den einzelnen Detektoren sind um Größenordnungen kleiner. Eine eindeutige Bestimmung der Eigenschaften dieser Teilchen wird damit aufgrund der erforderlichen extrem hohen Zeitauflösung schwierig.

Um dieses Problem zu lösen soll ein Aerogel-Čerenkov-Detektor in diesem Experiment in Betrieb genommen werden. Das Funktionsprinzip dieses Detektors wird im nächsten Kapitel erläutert.

Prinzip des Čerenkov-Detektors

3.1 Der Čerenkov-Effekt

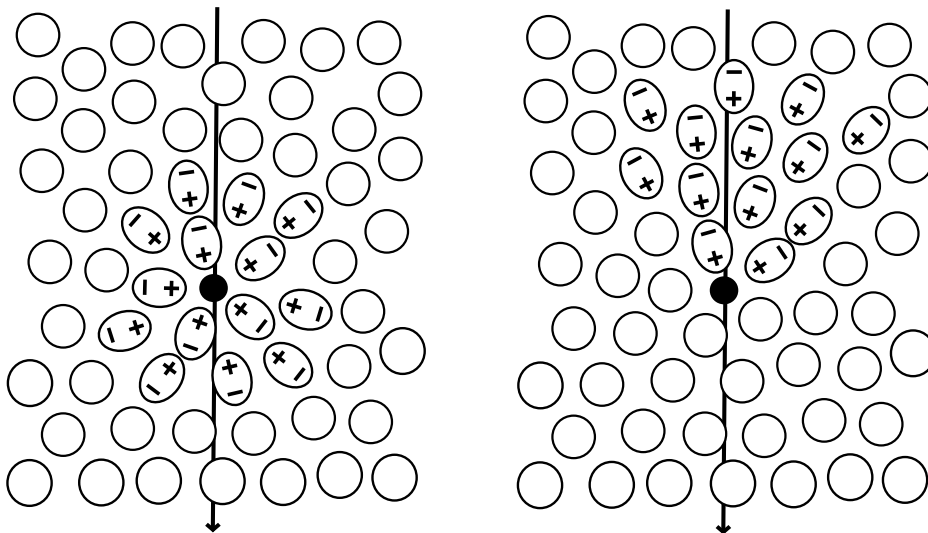


Abbildung 3.1: Polarisation der Atome durch geladene Teilchen die langsamer und schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Medium sind

Der Čerenkov-Effekt ist ein Phänomen, bei dem geladene Teilchen beim Durchgang durch Materie Strahlung emittieren, wenn ihre Geschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit im Material überschreitet. Pavel A. Čerenkov-Effekt wurde für die 1934 publizierte Erklärung dieses Effektes mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Eine anschauliche Erklärung dieses Effektes betrachtet die Wirkung des Teilchens auf die Atome des durchflogenen Mediums. Dabei werden die Atome durch das elektromagnetische Feld des Teilchens polarisiert (siehe Abbildung 3.1).

Wenn das Teilchen sich wesentlich langsamer bewegt als die elektromagnetischen Felder tritt dieser Effekt symmetrisch um das Teilchen auf und verschwindet wieder, sobald das Teilchen weitergeflogen ist. Das Gesamtfeld der Dipole hebt sich in größerer Entfernung zum Teilchen auf und es entsteht

keine weitreichende Strahlung.

Wenn das Teilchen sich schneller bewegt als die elektromagnetischen Felder können die Atome vor dem Teilchen nicht polarisiert werden, und die Dipole bleiben im Vergleich zur Bewegung des Teilchens länger erhalten. Durch die asymmetrische Überlagerung der Dipolfelder erreicht die Strahlung auch größere Entfernungen.

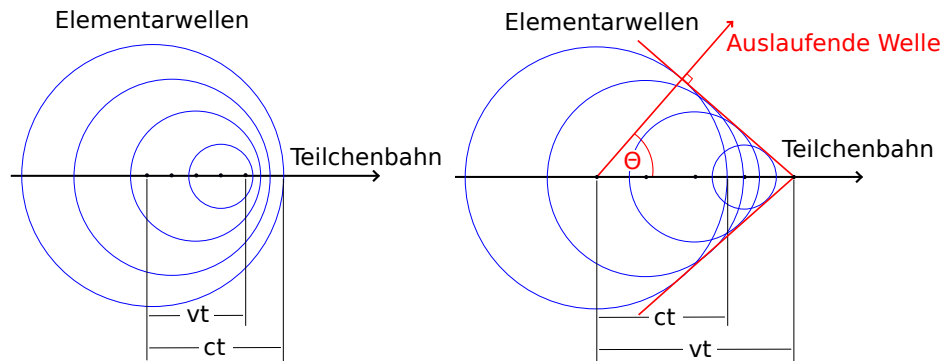


Abbildung 3.2: Überlagerung der Elementarwellen für Teilchen die langsamer und schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Medium sind

Aus der Überlagerung der Elementarwellen kann der Öffnungswinkel des Kegels bestimmt werden, in dem die Čerenkov-Strahlung emittiert wird (siehe Abbildung 3.2). Wenn $v \cdot t$ die vom Teilchen und $c_n \cdot t$ die vom Licht zurückgelegten Strecken sind, so gilt mit dem Brechungsindex n :

$$\cos(\Theta) = \frac{c_n \cdot t}{v \cdot t} = \frac{c_0}{v \cdot n} = \frac{1}{\beta \cdot n}$$

Der maximale Öffnungswinkel ist $\arccos\left(\frac{1}{n}\right)$ und der Effekt tritt erst auf, wenn $\beta > \frac{1}{n}$, da der Kosinus nicht größer als Eins sein kann.

3.2 Aerogel

Um mit dem Čerenkov-Effekt eine Geschwindigkeitsselektion verschiedener Teilchen durchführen zu können, muss der Brechungsindex des Radiatormaterials sehr präzise gewählt werden können. Da bei dem Effekt nur wenige Photonen entstehen, sollte das Material darüber hinaus möglichst wenig Licht absorbieren. Mit Festkörpern erreicht man nach [2] Brechungsindizes von 0 bis zu 1,31 und damit $\beta_{\max} = 0,673$, mit Gasen erreicht man Brechungsindizes von 1 bis zu 1,002 und damit $\beta_{\min} = 0,998$. Die gewünschten Brechungsindizes zur Unterscheidung der Teilchen liegen jedoch nach Abschnitt 2.2 zwischen diesen Werten, daher benötigt man ein anderes Material.

1931 erfand Samuel Kistler das Aerogel. Die verschiedenen Aerogele bestehen alle aus einer hochporösen Struktur, die zu 99 % mit Luft gefüllt ist. Damit sind Aerogele die leichtesten Festkörper der Welt. Ihre Dichte ist direkt mit ihrem Brechungsindex verknüpft und kann bei der Herstellung variiert werden. Die erreichbaren Brechungsindizes liegen zwischen 1,24 und 1,007, damit ist $\beta_{\min} = 0,806$ und $\beta_{\max} = 0,993$. Darüber hinaus sind Aerogele optisch transparent und eignen sich daher ideal als Radiatormaterial für Čerenkov-Detektoren.

3.3 Photomultiplier

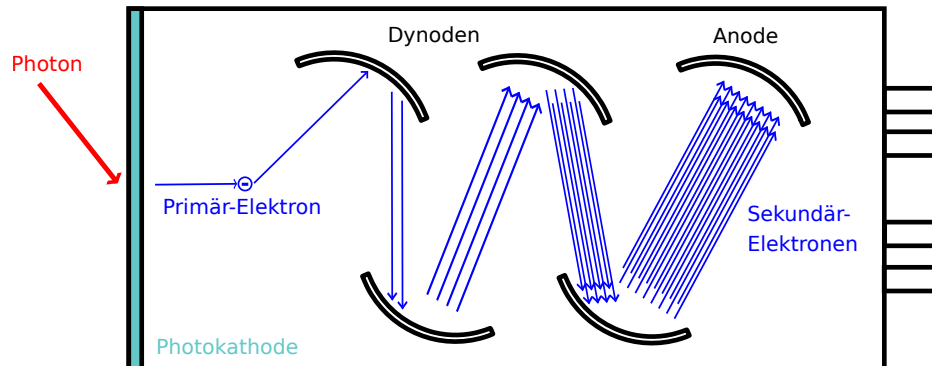


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers

Die Nutzung des Čerenkov-Effekts erfordert die zuverlässige Detektion einzelner Photonen. Photomultiplier sind Geräte, die speziell diese Eigenschaften besitzen.

In Photomultipliern treffen die Photonen auf eine Photokathode auf und lösen durch den photoelektrischen Effekt Elektronen aus (siehe Abbildung 3.3). Diese Elektronen werden durch eine zwischen der Kathode und der ersten Dynode angelegte Spannung beschleunigt und lösen beim Auftreffen auf die Dynode weitere Elektronen aus. Dieser Vorgang wiederholt sich in einer Kaskadenschaltung und endet mit einer messbaren Ladung auf der finalen Anode.

Der konkrete Aufbau und Status des Aerogel-Čerenkov-Detektors für das BGO-OD-Experiment wird im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

Der Aerogel-Čerenkov-Detektor

Der Aerogel-Čerenkov-Detektor für das BGO-OD Experiment wurde 2007 von Stefan Materne im Rahmen einer Diplomarbeit [3] konstruiert.

4.1 Aufbau

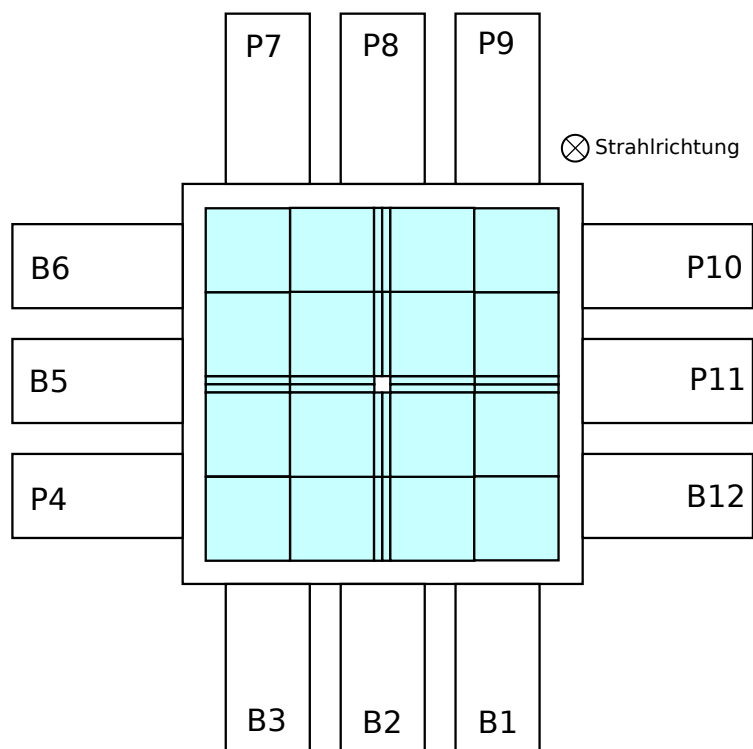


Abbildung 4.1: Aufbau des Aerogel-Čerenkov-Detektors für das BGO-OD Experiment. Der Strahl fällt in das Bild hinein. B kennzeichnet die Photomultiplier der Firma Burle, P die der Firma Philips

Der in Abbildung 4.1 dargestellte Detektor besteht aus einer $60 \times 60 \times 27$ cm Box, um die zwölf

Photomultiplier angeordnet sind. Das Innere der Box ist mit einer diffus hochreflektierenden Farbe angestrichen. Bei den zwölf Photomultipliern handelt es sich um sechs der Firma Burle (8854 Photomultiplier) und sechs der Firma Philips (XP 2041 Photomultiplier). Die Photomultiplier der Firma Burle arbeiten mit negativer Hochspannung, die der Firma Philips mit positiver Hochspannung.

Das Aerogel ist in Form von 88 Ziegeln in 4 Lagen im Inneren der Box zwischen Stahldrähten angebracht. Bei 16 dieser Ziegeln handelt es sich um halbierte Ziegel, die quer zu den anderen eingebaut sind und in der Mitte des Detektors eine Öffnung für den Primärstrahl aussparen. Der von den Ziegeln abgedeckte Bereich hat eine Fläche von 47×47 cm. Der Brechungsindex des Aerogels beträgt 1,05, damit ist die Grenzgeschwindigkeit $\beta = 0,952$.

4.2 Aktueller Status

Nach der Konstruktion des Detektors wurde er im Rahmen der Diplomarbeit von Stefan Materne im CBELSA/TAPS-Experiment getestet und seine Funktionstüchtigkeit bestätigt.

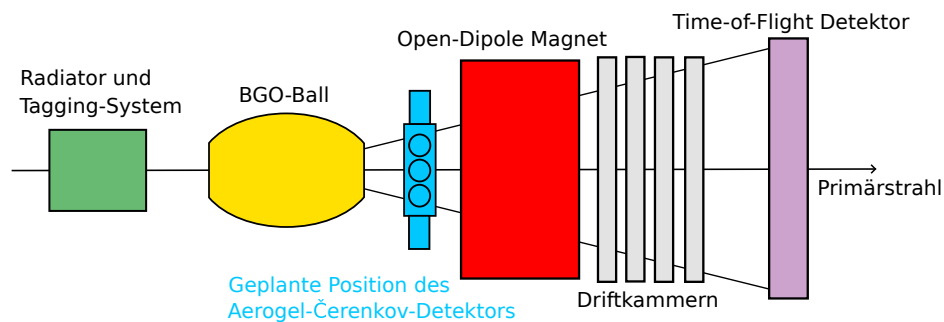


Abbildung 4.2: Geplante Position des Aerogel-Čerenkov-Detektors im BGO-OD-Experiment

Der finale Plan für die Nutzung des Detektors im BGO-OD-Experiment ist eine Platzierung zwischen dem BGO-Ball und dem Open-Dipole Magneten um den kompletten Winkelbereich des Vorwärtsspektrometers abzudecken (siehe Abbildung 4.2). Damit die Photomultiplier in solcher Nähe zu dem starken Feld des Magneten funktionieren, muss eine aufwendige Abschirmung konstruiert werden.

Bevor ein solches Projekt in Angriff genommen wird, sollte die prinzipielle Funktion des Detektors im Experiment nachgewiesen werden. Die Beschreibung und Auswertung der dazu durchgeführten Messreihe erfolgt im nächsten Kapitel.

Ergebnisse der Strahltests

5.1 Durchgeführte Messungen

Die hier beschriebene Messreihe wurde während der Strahlzeit des BGO-OD-Experiments im Dezember 2018 aufgenommen. Die konkreten Messungen wurden am 13.12.2018 durchgeführt.

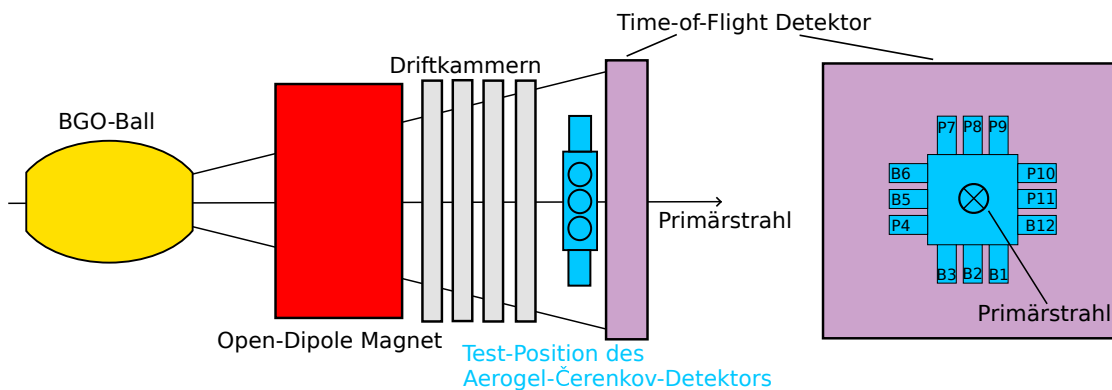


Abbildung 5.1: Test-Position des Aerogel-Čerenkov-Detektors im BGO-OD-Experiment

Da eine potentielle Abschirmung des Open-Dipole Magnetfeldes noch nicht konstruiert wurde, kann die prinzipielle Funktion des Detektors nicht an seinem finalen Ort überprüft werden. Eine einfach zugängliche alternative Position, die in einer Entfernung von ca. 1,5 m vom Magneten ist, ist zwischen den Driftkammern und dem Time-of-Flight Detektor des Vorwärtsspektrometers (siehe Abbildung 5.1). Der Nachteil dieser Position ist, dass das Aerogel des Detektors hier nur ca. 3 % des $3,6 \times 3$ m großen Time-of-Flight Detektors abdeckt. Für die Testzwecke dieser Messreihe ist sie jedoch die am besten geeignete Position.

Zur Positionierung des Aerogel-Čerenkov-Detektors wurde das bereits vorhandene Gerüst aus extrudierten Aluminiumschienen, das die anderen Detektoren trägt, erweitert. Der Detektor wurde auf dieses Gerüst abgelegt und blieb zur Sicherheit im Kran eingehängt. Die finale Position des Detektors wurde so gewählt, dass der Primärstrahl möglichst mittig durch ihn hindurchführte und er so im Bereich mit der höchsten Teilchenrate lag.

Die Spannungsversorgung für die Photomultiplier wurde zweigeteilt: Die Philips-Photomultiplier

wurden über einen Spannungsversorgungskasten des BGO-OD Experimentes an Hochspannung angeschlossen. Diese Spannungen konnten über die Software des Experiments gesteuert werden. Die Burle-Photomultiplier wurden über 4 Labor-Hochspannungsversorgungen angeschlossen und von Hand eingestellt. Die Einstellungen für die einzelnen Photomultiplier wurden nach den Ergebnissen der Labormessungen so gewählt, dass die Effizienz der Detektoren im Rahmen ihrer Operationseigenschaften maximiert wird. Die Betriebsspannung wurde auf je nach Photomultiplier positive beziehungsweise negative 2,6 kV gesetzt. Der resultierende Strom betrug für alle Photomultiplier ungefähr 1,16 mA.

Die Ausgangssignale der Photomultiplier wurden an einen Sampling-Digital-Analog-Converter (SADC) angeschlossen, der in das Auswertungssystem des BGO-OD-Experiments eingebaut wurde. Die Abtastrate des SADC wurde auf ein Gigasample gestellt und der Trigger an den Trigger des BGO-OD-Experiments gekoppelt. Dieser wurde so eingestellt, dass sowohl garantiert ein Ereignis im Target stattgefunden haben muss, als auch ein Teilchen durch das Vorwärtsspektrometer geflogen sein muss, sodass dieses für die Auswertung verwendet werden kann.

Abgesehen von Testmessungen zur Überprüfung der Funktion aller Systeme wurden mit diesen Einstellungen bei mit Wasserstoff gefüllten Target 19 Messreihen mit je 100 000 Ereignissen aufgenommen. Die Daten wurden im System des BGO-OD-Experiments gespeichert. Im folgenden wird ihre Auswertung beschrieben.

5.2 Auswertung

Die aufgezeichneten Messdaten stehen innerhalb des vom BGO-OD-Experiment verwendeten Programmpakets EXPLORA zu Verfügung. Dieses Programmpaket wird benutzt um die nachfolgende Auswertung anzufertigen. Für jedes vom System des BGO-OD-Experiments aufgezeichnete Ereignis stehen die zwölf Datensätze mit je 1 024 Einträgen für die vom SADC gemessenen Spannungen der Photomultiplier sowie die rekonstruierten Eigenschaften und Flugbahnen der vom restlichen System erfassten Teilchen zu Verfügung. Die für die Auswertung wichtigsten Eigenschaften dieser Teilchen sind ihre Masse, ihre Geschwindigkeit und ihre Durchgangsposition durch den Time-of-Flight-Detektor. Die Durchgangsposition ist wichtig, um die Teilchen - die den Aerogel-Čerenkov-Detektor durchquert haben - zu identifizieren, da nur diese Signale im Detektor erzeugt haben können.

5.2.1 Verarbeitung einzelner Signale

Die Abbildung 5.2 zeigt vier beispielhafte Histogramme von vier verschiedenen Ereignissen des Photomultipliers P11. In den ersten beiden Histogrammen ist das typische Spannungs-Verhalten aller Photomultiplier zu sehen, wenn kein eindeutiges Signal vorliegt. Die periodisch erscheinende Schwankung des Mittelwerts hat eine Frequenz von 2 MHz und tritt in allen Histogrammen für ein einzelnes Ereignis in Phase auf. Da die einzige Stelle an der alle Photomultiplier miteinander verbunden sind der SADC ist, wird diese Schwankung des Mittelwerts wahrscheinlich von diesem verursacht. Für die nachfolgende Auswertung hat sich dieser Effekt als nicht problematisch erwiesen, in anderen Fällen könnte man jedoch auf eine andere Methode zur Aufnahme der Daten wechseln. In den beiden letzten Histogrammen sind Ereignisse zu sehen, bei denen ein klarer Photomultiplier-Puls vorliegt, bei dem letzten Histogramm sogar zwei.

Da offensichtlich einzelne Detektoren bei einzelnen Ereignissen mehrere Signale abgeben können

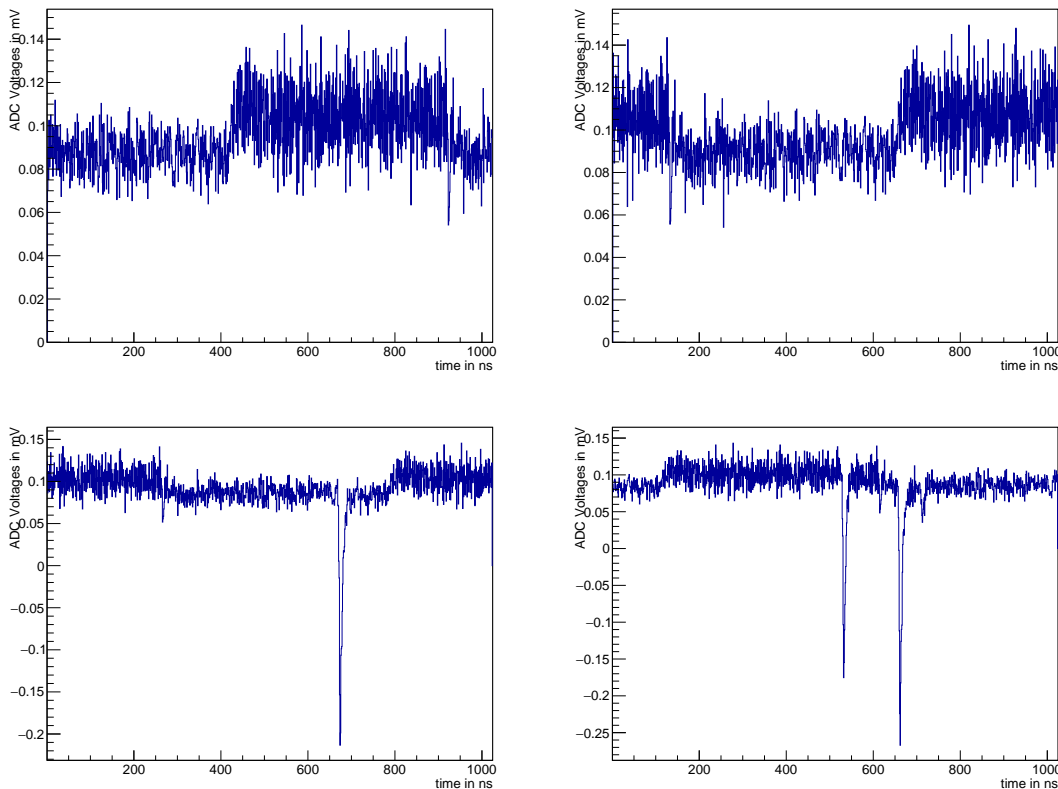


Abbildung 5.2: Histogramme von vier einzelnen Ereignissen für den Photomultiplier P11

die zu stark verschiedenen Zeiten auftreten, reicht eine einfache Schwellen-Diskrimination nicht aus, um die Multiplizität (die Anzahl an Photomultipliern, die gleichzeitig ein Signal detektieren) zu bestimmen.

Zur weiteren Auswertung wurden daher für jeden Photomultiplier alle einzelnen Signal-Peaks die über einem Schwellenwert lagen identifiziert. Dabei wurden Position und Wert des Peak-Minimums gespeichert. In Abbildung 5.3 sind zwei Histogramme dargestellt, die die zeitliche Verteilung dieser Peak-Minima bei zufälligen Schwellenwerten über alle Ereignisse hinweg darstellen. Die in dieser Abbildung für alle Photomultiplier erkennbaren periodisch auftretenden Peaks haben eine Frequenz von $(29,4 \pm 1,0)$ MHz, treten jedoch für jeden Photomultiplier mit einer anderen Häufigkeit auf. Die Periodendauer dieser Peaks entspricht einer zurückgelegten Strecke von $(10,2 \pm 0,4)$ m, was mit der ungefähren Länge der Signalkabel übereinstimmt. Um diese vermutlich aus Reflektionen entstandenen Signale zu unterdrücken wurden die Schwellenwerte für jeden Photomultiplier so gewählt, dass die periodisch auftretenden Signale gerade nicht mehr auftraten (siehe Abbildung 5.4). Die verwendeten Schwellenwerte sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

5.2.2 Bestimmung der Multiplizitäten

In der Abbildung 5.5 sowie 1 und 2 sind die zeitlichen Verteilungen der Peak-Minima dargestellt. Für alle Photomultiplier lässt sich klar ein Gauß-Peak auf Rausch-Untergrund erkennen. Die

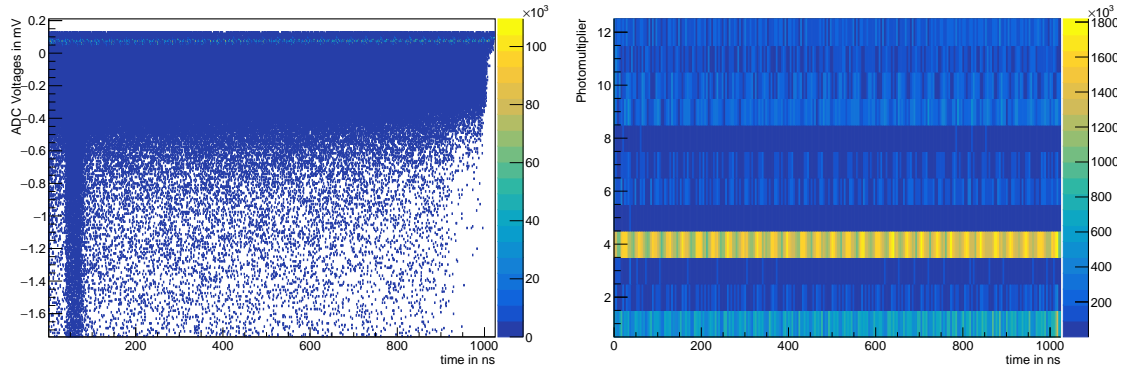


Abbildung 5.3: Histogramme der zeitlichen Verteilung der Peak-Minima über alle Ereignisse. Das linke Histogramm ist von Photomultiplier P11 bei Schwellenwert $130 \mu\text{V}$, das rechte Histogramm stellt eine Übersicht über die zeitliche Verteilung der Peak-Minima aller Photomultiplier bei zufälligen Schwellenwerten dar.

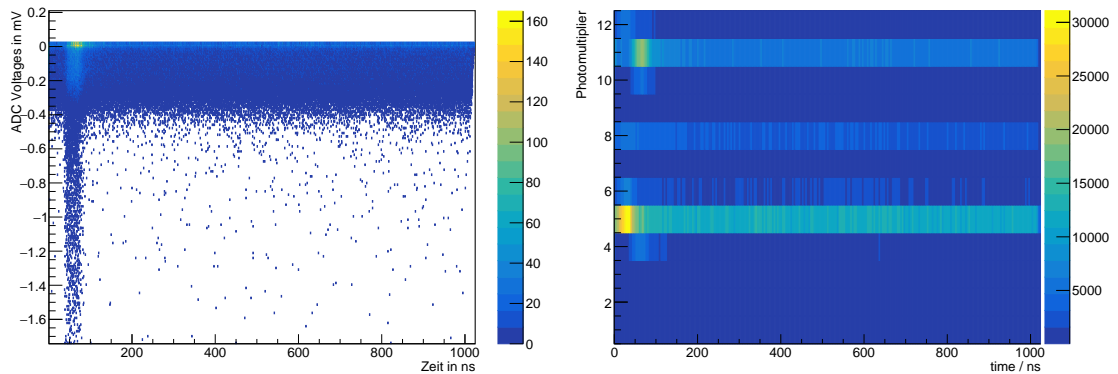


Abbildung 5.4: Histogramme der zeitlichen Verteilung der Peak-Minima über alle Ereignisse für die weiterverwendeten Schwellenwerte. Das linke Histogramm ist von Photomultiplier P11, das rechte Histogramm stellt eine Übersicht über die zeitliche Verteilung der Peak-Minima aller Photomultiplier dar.

Photomultiplier	B1	B2	B3	P4	B5	B6	P7	P8	P9	P10	P11	B12
Schwellenwert [μV]	-10	30	30	10	40	40	10	0	30	30	30	40

Tabelle 5.1: Verwendete Schwellenwerte der Photomultiplier

Photomultiplier P4 bis B6 und P10 bis B12 weisen wesentlich höhere Signalaraten auf als die anderen Photomultiplier, was darauf zurückzuführen ist, dass sie aufgrund ihrer horizontalen Ausrichtung im Bezug zum Strahlverlauf genau in der Ebene lagen, in die das Magnetfeld des Open-Dipole-Magneten die meisten Teilchen lenkt. Der Photomultiplier P8 weist ein im Vergleich zu den benachbarten Photomultipliern P7 und P9 vielfach stärkeres Rausch- und Hauptsignal auf, das Verhältnis zu den beiden benachbarten Photomultipliern ist auch in Richtung des Rauschens verschoben. Dies lässt auf eine Fehlfunktion oder Beschädigung des Photomultipliers schließen.

Um die Ereignisse innerhalb des Gauß-Peaks selektieren zu können, wurde an die Verteilung für jeden Photomultiplier eine Überlagerung aus einer Gauß-Funktion und einer konstanten Funktion angepasst. Die Ergebnisse für die Mittelwerte und Standardabweichungen der Gauß-Kurven sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

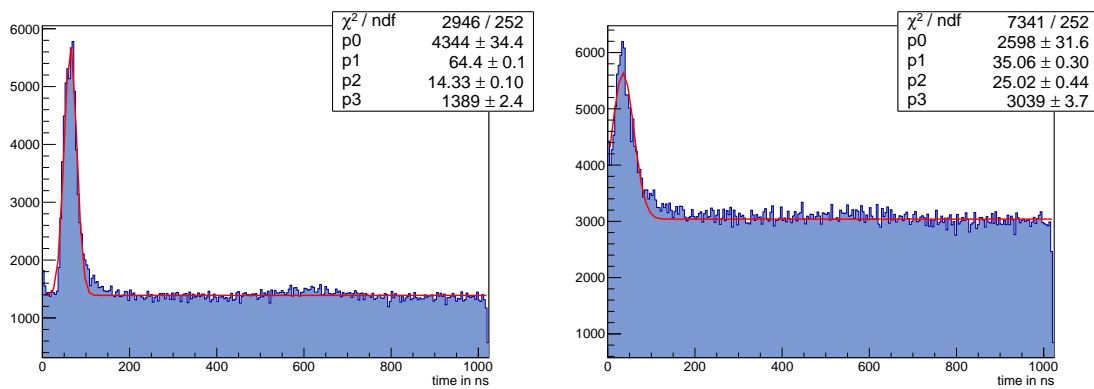


Abbildung 5.5: Histogramme der zeitlichen Verteilung der Peak-Minima über alle Ereignisse. Das linke Histogramm ist von Photomultiplier P4 und das rechte Histogramm von Photomultiplier P8. In den Histogrammen sind auch die Parameter der Anpassung dargestellt, p0 ist die Höhe der Gauß-Kurve, p1 der Mittelwert, p2 die Standardabweichung und p3 der Offset des Rauschens.

Photomultiplier	B1	B2	B3	P4	B5	B6	P7	P8	P9	P10	P11	B12
Mittelwert [ns]	66	66	66	64	29	32	28	35	30	67	68	31
Standardabweichung [ns]	16	14	15	14	20	17	18	25	15	15	16	17

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Anpassung einer Überlagerung aus einer Gauß-Funktion und einer konstanten Funktion an die absoluten zeitliche Verteilung der Peak-Minima aller Photomultiplier. Die Werte sind auf 0 Stellen gerundet, da die Auflösung des SADC 1 ns ist.

Da die Standardabweichungen aus dieser Anpassung recht groß wirkten, wurde vermutet, dass dies durch eine zeitlich verteilte Auslösung des SADC verursacht wurde. Um diese Theorie zu überprüfen und eine eventuell präzisere Selektion durchzuführen wurden zusätzlich zu der bereits durchgeführten absoluten Auswertung für jeden Photomultiplier eine weitere relative Auswertung durchgeführt. Dabei wurde für alle Peaks eines ausgewählten Photomultipliers der zeitliche Abstand zu allen Peaks anderer Photomultiplier in ein Histogramm eingetragen (siehe Abbildung 5.6). Es lassen sich wieder klar Gauß-Peaks auf Rausch-Untergründen erkennen. An alle $12 \times 11 = 132$ Histogramme wurden daher

Überlagerungen aus einer Gauß-Funktion und einer konstanten Funktion angepasst. In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse dieser Anpassungen relativ zum Photomultiplier P11 dargestellt, in den Tabellen 1 und 2 für alle Photomultiplier.

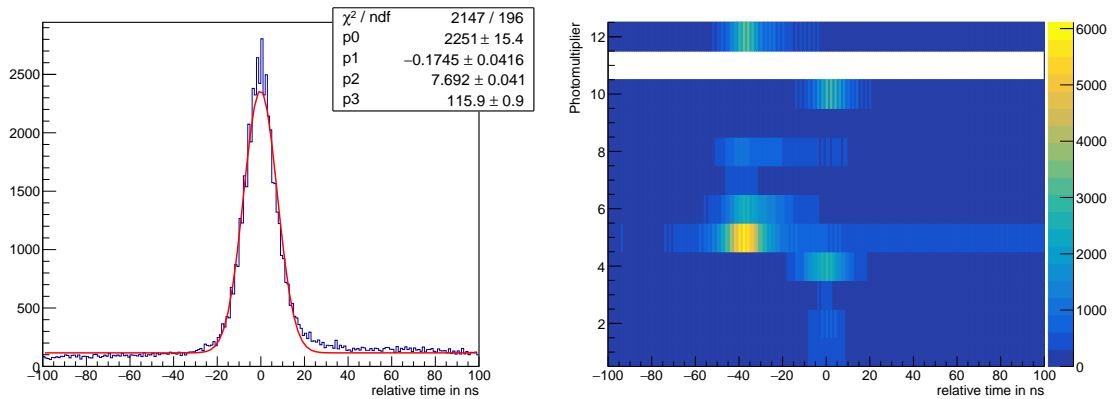


Abbildung 5.6: Histogramme der relativen zeitlichen Verteilung der Peaks über alle Ereignisse im Bezug zum Photomultiplier P11. Das linke Histogramm zeigt nur die Peaks von Photomultiplier P4, das rechte Histogramm stellt eine Übersicht dar. In dem linken Histogrammen sind auch die Parameter der Anpassung dargestellt, p0 ist die Höhe der Gauß-Kurve, p1 der Mittelwert, p2 die Standardabweichung und p3 der Offset des Rauschens.

Photomultiplier	B1	B2	B3	P4	B5	B6	P7	P8	P9	P10	P11	B12
Mittelwert [ns]	2	1	1	0	-36	-32	-37	-38	-35	3		-35
Standardabweichung [ns]	11	9	10	9	11	13	11	9	1	8		10

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Anpassung einer Überlagerung aus einer Gauß-Funktion und einer konstanten Funktion an die relative zeitliche Verteilung der Peak-Minima aller Photomultiplier im Bezug auf den Photomultiplier P11. Die Werte sind auf 0 Stellen gerundet, da die Auflösung des SADC 1 ns ist.

Vergleicht man die Anpassungsergebnisse der beiden Verfahren, so sieht man an den Standardabweichungen, die bei der relativen Methode etwa um den Faktor 1,7 kleiner sind als bei der absoluten Methode, dass die verschiedenen Signale tatsächlich Aufgrund einer für alle Photomultiplier gleichen zeitlichen Verschiebung nach der absoluten Auswertung breiter verteilt waren.

Für die weitere Auswertung wurde nun ein Verfahren implementiert, bei dem die Multiplizität sowohl nach der absoluten als auch nach der relativen Auswertung bestimmt wurde. Für beide wurde ein gemeinsamer Parameter κ eingeführt. Bei der absoluten Auswertung wurde für die Anzahl der Peak-Minima, die innerhalb von $\pm\kappa \cdot \sigma$ der absoluten Mittelwerte der entsprechenden Photomultiplier liegen, als absolute Multiplizität bestimmt. Für die relative Auswertung wurde für jedes Peak-Minimum die Anzahl der Peak-Minima anderer Photomultiplier, die innerhalb von $\pm\kappa \cdot \sigma$ der relativen Mittelwerte bestimmt. Die höchste solche Anzahl wird dann als die relative Multiplizität festgelegt.

5.2.3 Bestimmung des vom Detektors abgedeckten Bereichs

Um im weiteren Beurteilen zu können, wie präzise der Aerogel-Čerenkov-Detektor zwischen Teilchen mit $\beta > 0,952$ und $\beta < 0,952$ unterscheiden kann, muss zunächst bestimmt werden, welche der vom Vorwärtsspektrometer erfassten Teilchen auch den Detektor durchquert haben. Dazu wurden für alle vom Vorwärtsspektrometer detektierten Teilchen, bei denen gleichzeitig die Multiplizität der absoluten Auswertung 3 oder größer war, die Durchgangsposition in ein Histogramm eingetragen (siehe Abbildung 5.7).

Da sowohl der Detektor als auch der Primärstrahl in der Mitte des Vorwärtsspektrometers liegen, ist eine direkte Bestimmung der Position des Detektors nicht möglich. Daher wurde in Abbildung 5.8 das Verhältnis aus den beiden Histogrammen in Abbildung 5.7 gebildet. Hier ist der vom Detektor abgedeckte Bereich schon besser zu erkennen. Um ihn jedoch möglichst exakt bestimmen zu können, wurden nun abwechselnd kleiner werdende Projektionen in X- und Y-Ausrichtung angefertigt, um sich an die Abmessungen des Detektors heranzutasten. In Abbildung 5.9 sind die zwei finalen Projektionen dargestellt. Die finalen Grenzparameter sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Der Abstand der Parameter ist mit 70 cm um einiges größer als der Aerogel-Block von 47×47 cm. Dies lässt darauf schließen, dass einige der Photomultiplier durch direkte Treffer von Teilchen ausgelöst wurden, was zum Rausch-Untergrund beiträgt.

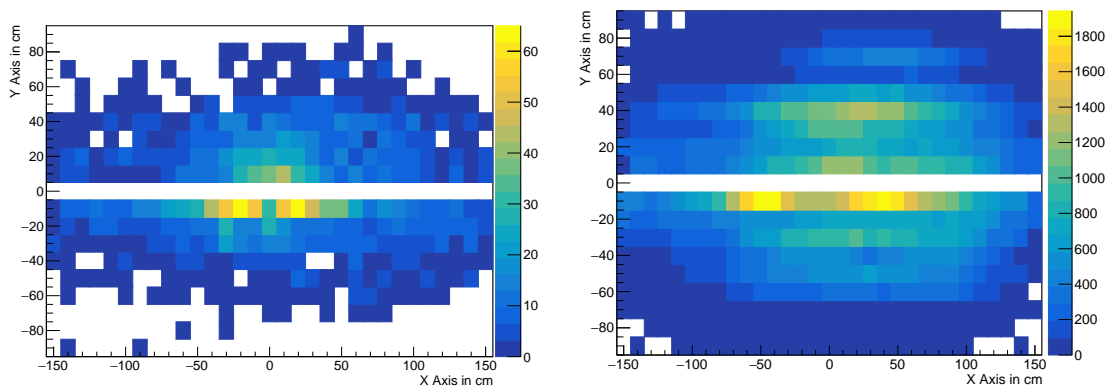


Abbildung 5.7: Histogramme der Positionen im Vorwärtsspektrometer. Das linke Histogramm stellt die Positionen von Teilchen nach der absoluten Auswertung dar, das rechte Histogramm die aller Teilchen die detektiert wurden.

Parameter	X	Y
Minimum [cm]	-35	-35
Maximum [cm]	35	35

Tabelle 5.4: Verwendete Grenzparameter der Positionen im Vorwärtsspektrometer.

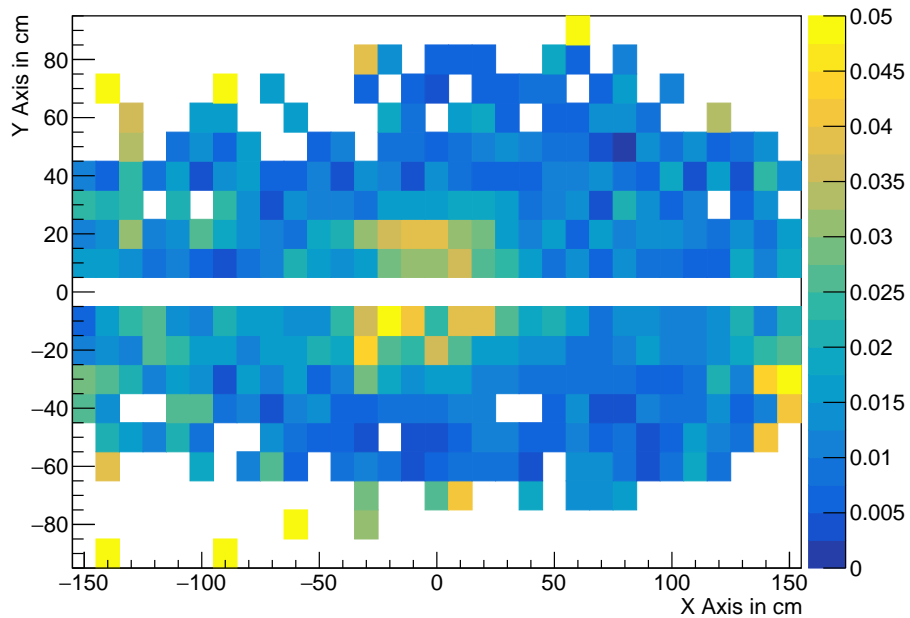


Abbildung 5.8: Verältnis-Histogramm der Positionen im Vorwärtsspektrometer der Teilchen nach der absoluten Auswertung. Um das Histogramm besser lesbar zu machen wurde der Maximalwert auf 0,05 festgesetzt. Die einzelnen Punkte mit hohen Werten am Rand stellen einzelne Teilchen dar und sind daher statistisch nicht relevant.

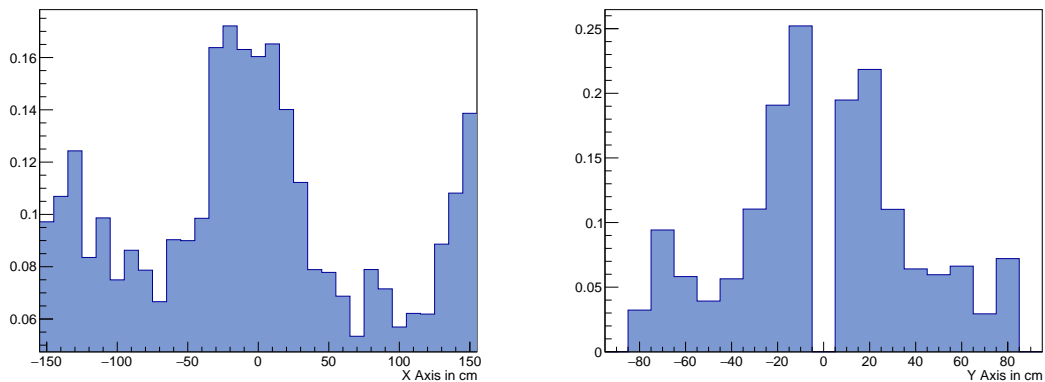


Abbildung 5.9: Projektionen des Verältnis-Histogramms der Positionen im Vorwärtsspektrometer der Teilchen nach der absoluten Auswertung. Die linke Projektion geht von $Y = -35$ cm bis $Y = 35$ cm, die rechte Projektion von $X = -35$ cm bis $X = 35$ cm.

5.2.4 Bestimmung der Detektor-Präzision und Detektionsrate

Um die Präzision des Detektors begutachten zu können wurde zunächst die allgemeine Verteilung der Geschwindigkeiten innerhalb des vom Detektor abgedeckten Bereichs erfasst (siehe Abbildung 5.10). Aus diesem Histogramm wurde die Anzahl an Teilchen, deren Geschwindigkeit über beziehungsweise unter der Grenzgeschwindigkeit $\beta = 0,952$ des Aerogel-Čerenkov-Detektors liegt, bestimmt. Diese Werte sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

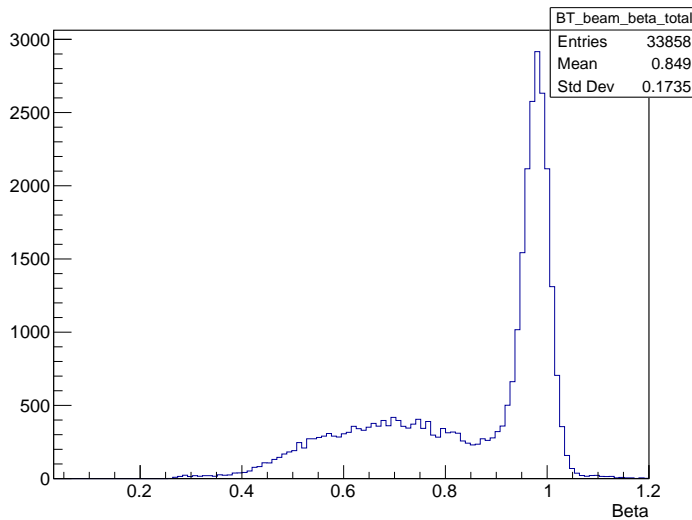


Abbildung 5.10: Histogramm der Verteilung der Geschwindigkeiten innerhalb des vom Detektor abgedeckten Bereichs.

Parameter	Unter	Über
Anzahl [10^3]	17,6	16,3

Tabelle 5.5: Anzahl an Teilchen, deren Geschwindigkeit über beziehungsweise unter der Grenzgeschwindigkeit $\beta = 0,952$ des Aerogel-Čerenkov-Detektors liegt.

Nun wird für die drei unterschiedlichen Werte $\kappa = 0,6$, $\kappa = 1$ und $\kappa = 2$ des Parameters κ (siehe Abschnitt 5.2.2) sowie für die beiden unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung der Multiplizität jeweils die Multiplizität gegen die Geschwindigkeiten β der innerhalb des vom Detektor abgedeckten Bereichs erfassten Teilchen in der Abbildung 5.11 aufgetragen.

Für alle 6 Graphen werden jeweils eine Projektion mit $\beta > 0,952$ und eine Projektion mit $\beta < 0,952$ angefertigt (siehe Abbildung 5.12). Aus diesen Projektionen wird für jede minimale Multiplizität M die Anzahl an Ereignissen, die diese minimale Multiplizität überschritten hätten, bestimmt (siehe Tabelle 5.6).

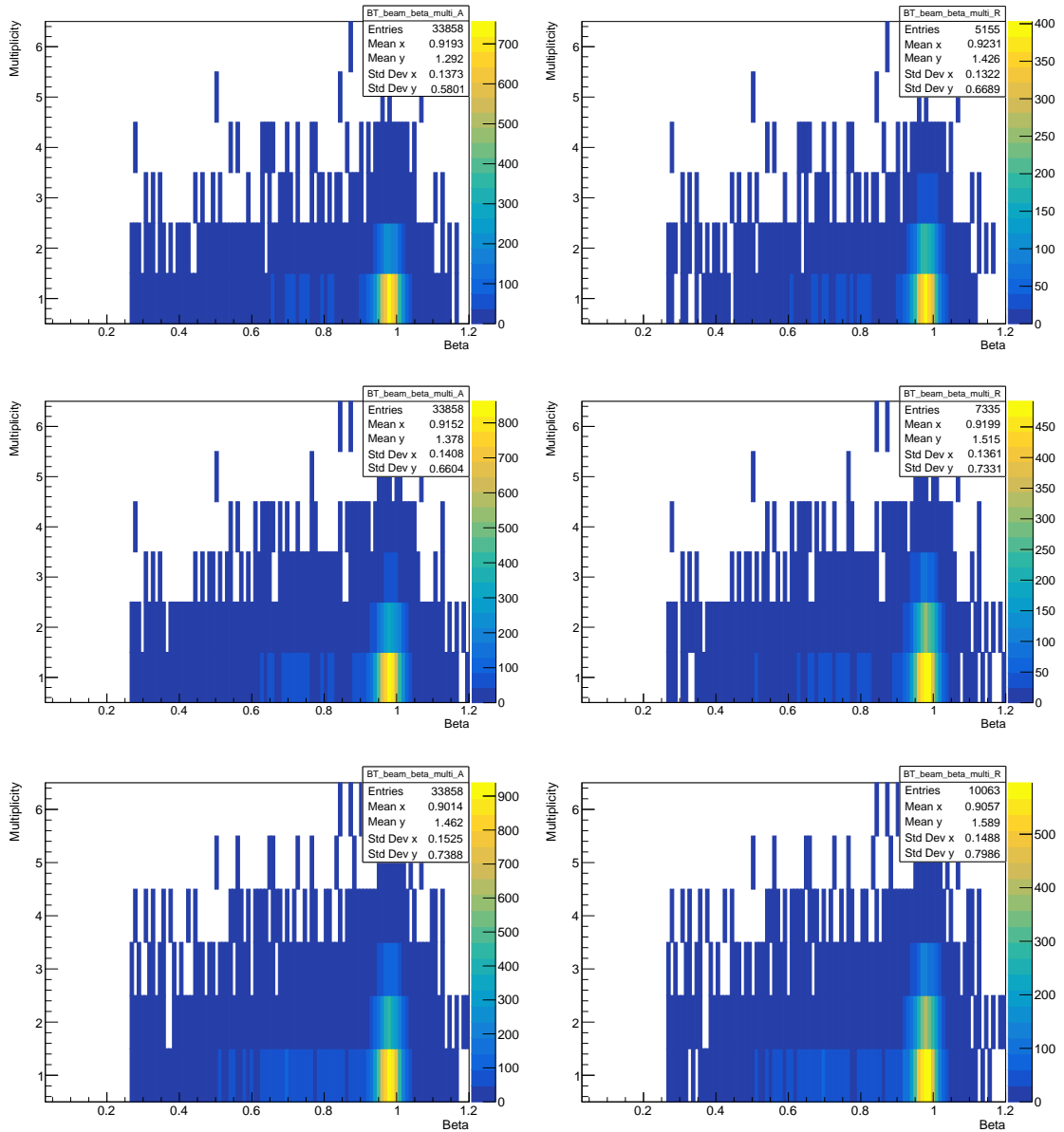


Abbildung 5.11: Histogramm der Verteilung der Multiplizität gegen die Geschwindigkeit β . Auf der linken Seite sind die mit der absoluten Auswertung bestimmten Histogramme, auf der rechten Seite die mit der relativen Auswertung bestimmten Histogramme dargestellt. Von oben nach unten ist $\kappa = 0,6$, $\kappa = 1$ und $\kappa = 2$.

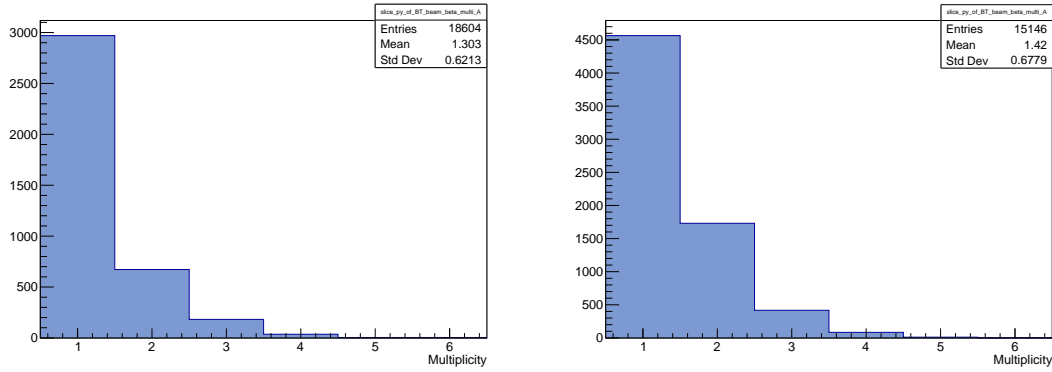


Abbildung 5.12: Projektion der Verhältnisse von Multiplizität und β nach der absoluten Auswertung für $\kappa = 1$. Die linke Projektion ist für alle $\beta < 0,952$, die rechte Projektion für alle $\beta > 0,952$.

		Anzahl [10^3]				
minimale Multiplizität		1	2	3	4	
$\kappa = 0,6$	absolut	$\beta > 0,952$	5,4	1,4	0,3	0,1
		$\beta < 0,952$	2,9	0,5	0,1	0,0
	relativ	$\beta > 0,952$	3,6	1,3	0,3	0,1
		$\beta < 0,952$	1,8	0,5	0,1	0,0
$\kappa = 1$	absolut	$\beta > 0,952$	6,8	2,2	0,5	0,1
		$\beta < 0,952$	4,0	1,0	0,3	0,1
	relativ	$\beta > 0,952$	4,8	2,1	0,5	0,1
		$\beta < 0,952$	2,6	0,9	0,3	0,1
$\kappa = 2$	absolut	$\beta > 0,952$	8,0	3,0	0,8	0,1
		$\beta < 0,952$	5,4	1,5	0,4	0,1
	relativ	$\beta > 0,952$	6,1	2,9	0,9	0,2
		$\beta < 0,952$	3,9	1,35	0,4	0,1

Tabelle 5.6: Anzahl an Teilchen, deren Geschwindigkeit über beziehungsweise unter der Grenzggeschwindigkeit $\beta = 0,952$ des Aerogel-Čerenkov-Detektors liegt, in Abhängigkeit von κ und der Auswertungs-Methode.

5.3 Ergebnisse

Um die Ergebnisse des vorherigen Abschnitts 5.2.4 auswerten zu können, werden die Werte der Tabelle 5.6 durch die Werte der Tabelle 5.5 geteilt. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 5.7.

An dieser Tabelle kann man erkennen, dass der Detektor unter allen untersuchten Bedingungen Teilchen über der Grenzgeschwindigkeit wahrscheinlicher erfasst als Teilchen unter der Grenzgeschwindigkeit. Die prinzipielle Funktion des Detektors im Experiment wurde damit belegt.

Darüber hinaus steigt wie erwartet die Präzision des Detektors bei Steigerung der minimalen Multiplizität bis zu einem gewissen Punkt, ab der aufgrund der gleichzeitig fallenden Detektions-Rate das Rauschen an Dominanz gewinnt. Wie immer muss man bei der Wahl der minimalen Multiplizität eine Abwägung zwischen Präzision und Detektionsrate fällen.

Der Einfluss des Faktors κ zeigt sich auch wie Erwartet: Mit sinkendem κ steigt die Präzision des Detektors und sinkt gleichzeitig die Detektionsrate. Zur Wahl des Parameters gelten die selben Überlegungen wie bei der minimalen Multiplizität.

Der Unterschied zwischen absoluter und relativer Auswertung weist einige Interessante Punkte auf. Für $\kappa = 2$ und $\kappa = 1$ weist die relative Auswertung eine bessere Präzision als die absolute Auswertung auf. Die absolute Auswertung hat jedoch nur für die minimale Multiplizität 1 eine bessere Detektionsrate, was auf die bessere Rausch-Vermeidung durch den kleineren Erfassungsbereich zurückzuführen ist. Für $\kappa = 0,6$ zeigt sich jedoch keine eindeutige Beziehung. Dies liegt vermutlich wieder daran, dass bei diesen geringen Detektions-Raten das Rauschen an Dominanz-gewinnt.

Die beste erreichte Präzision liegt bei dem Verhältnis 3,86 für die Einstellung $\kappa = 0,6$, $M = 3$ unter absoluter Auswertung. Die beste erreichte Detektionsrate liegt bei 49,1 % für die Einstellung $\kappa = 2$, $M = 1$ unter absoluter Auswertung.

All diese Ergebnisse konnten erreicht werden, obwohl nur ein Teil der Teilchen den Detektor durchquerte und obwohl der Detektor einem verhältnismäßig großen Anteil an Rauschen ausgesetzt war. Dies bedeutet für den geplanten finalen Einbau im BGO-OD-Experiment, dass dieser nach den erforderlichen Modifikationen zur Abschirmung des Magnetfeldes des Open-Dipole-Magneten mit nur minimaler Ausbesserung und eventuellem Austausch des Photomultipliers P8 durchgeführt werden kann. Es wird jedoch eine ausführliche und sorgfältige Kalibration des Detektors nach diesem Einbau nötig sein.

minimale Multiplizität			Anteil				Verhältnis			
			1	2	3	4	1	2	3	4
$\kappa = 0,6$	absolut	$\beta > 0,952$	33,1 ‰	8,6 ‰	1,5 ‰	0,3 ‰	2,03	2,91	3,86	2,70
		$\beta < 0,952$	16,3 ‰	3,0 ‰	0,4 ‰	0,1 ‰				
	relativ	$\beta > 0,952$	22,1 ‰	7,7 ‰	1,5 ‰	0,3 ‰	2,20	2,60	2,25	2,70
		$\beta < 0,952$	10,1 ‰	3,0 ‰	0,7 ‰	0,1 ‰				
$\kappa = 1$	absolut	$\beta > 0,952$	41,7 ‰	13,5 ‰	3,1 ‰	0,6 ‰	1,86	2,50	2,16	2,16
		$\beta < 0,952$	22,4 ‰	5,4 ‰	1,4 ‰	0,3 ‰				
	relativ	$\beta > 0,952$	29,1 ‰	12,6 ‰	3,1 ‰	0,6 ‰	2,01	2,60	2,16	2,16
		$\beta < 0,952$	14,5 ‰	4,8 ‰	1,4 ‰	0,3 ‰				
$\kappa = 2$	absolut	$\beta > 0,952$	49,1 ‰	18,4 ‰	4,9 ‰	0,6 ‰	1,60	2,16	2,16	1,08
		$\beta < 0,952$	30,7 ‰	8,5 ‰	2,3 ‰	0,6 ‰				
	relativ	$\beta > 0,952$	37,4 ‰	17,8 ‰	5,2 ‰	0,9 ‰	1,71	2,32	2,62	3,24
		$\beta < 0,952$	21,9 ‰	7,7 ‰	2,0 ‰	0,3 ‰				

Tabelle 5.7: Anteile und Verhältnisse der Anzahl der Teilchen, deren Geschwindigkeit über beziehungsweise unter der Grenzggeschwindigkeit $\beta = 0,952$ des Aerogel-Čerenkov-Detektors liegt, in Abhängigkeit von κ und der Auswertungs-Methode. Der Anteil ist jeweils an der Gesamtzahl der Teilchen im entsprechenden Geschwindigkeitsbereich, das Verhältnis ist das Verhältnis der jeweiligen Anteile.

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, die prinzipielle Funktion des Aerogel-Čerenkov-Detektors im BGO-OD-Experiment zu bestätigen. Dazu wurde der Detektor für eine Testmessung in das BGO-OD-Experiment eingebaut und temporär integriert. Während der Strahlzeit wurde eine Messreihe aufgenommen, die im Weiteren ausgewertet wurde.

Die Signale der Photomultiplier des Aerogel-Čerenkov-Detektors wurden auf Peaks untersucht. Da die Streuung der zeitlichen Verteilung der Peaks sich nach einer absoluten Analyse als groß herausgestellt hat, wurde zusätzlich eine relative Analyse der Verteilung durchgeführt. Diese Analyse führte wie erwartet zu einer kleineren Streuung. Verbesserte Datenerfassungsmethoden könnten in Zukunft die Eigenschaften des Detektors dahin verbessern, dass die aufwendige relative Analyse nicht mehr notwendig wird.

Mit den erhaltenen Daten wurde die genaue Position des Aerogel-Čerenkov-Detektors im Vorwärtspektrometer bestimmt. Anschließend wurde dann die Präzision und Detektionsrate des Aerogel-Čerenkov-Detektors in Abhängigkeit von der Analysemethode sowie von weiteren Parametern der Auswertung untersucht. Dabei wurden die erwarteten Beziehungen und die Funktion des Detektors als Geschwindigkeits-Diskriminator unter allen untersuchten Bedingungen bestätigt.

Um den Detektor an seinem finalen Platz in Betrieb nehmen zu können, werden neben der Konstruktion der Abschirmung zusätzlich ausführliche Kalibrierungsmessungen durchzuführen sein.

Literatur

- [1] ELSA-Homepage, 2019, [HTTP://WWW-ELSA.PHYSIK.UNI-BONN.DE/ELSA.HTML](http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/elsa.html),
- [2] Hermann Kolanoski, Norbert Wermes, "Teilchendetektoren: Grundlagen und Anwendungen", Springer Spektrum, 2016
- [3] Stefan Materne, "Ein Aerogel-Cherenkov-Detektor für das CBELSA/TAPS Experiment", Diplomarbeit, 2007

Appendix

Histogramme

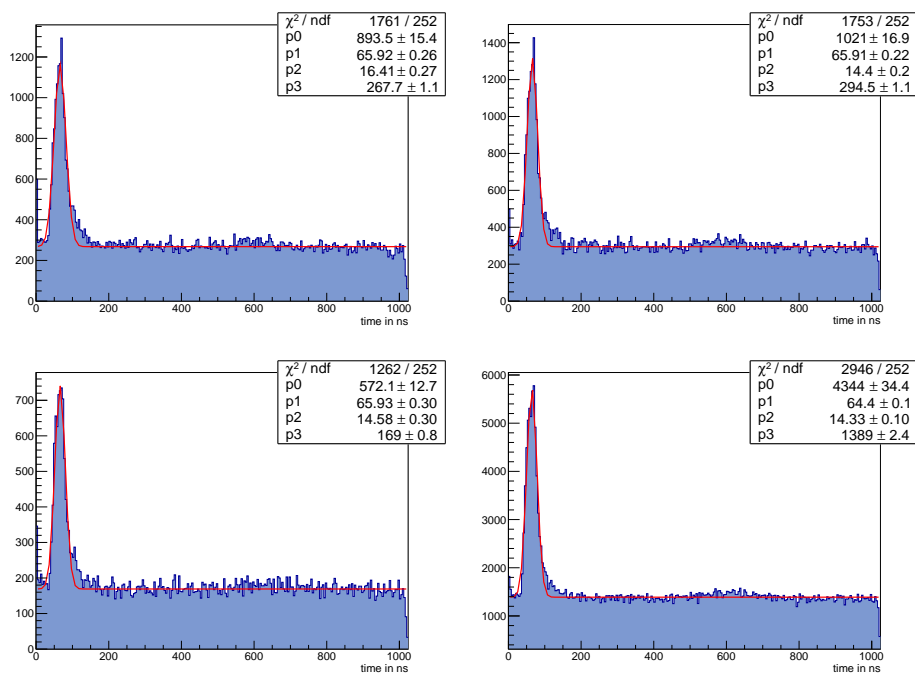


Abbildung 1: Histogramme der zeitlichen Verteilung der Peak-Minima über alle Ereignisse. Von links oben nach rechts unten für die Photomultiplier B1, B2, B3 und P4. In den Histogrammen sind auch die Parameter der Anpassung dargestellt, p0 ist die Höhe der Gauß-Kurve, p1 der Mittelwert, p2 die Standardabweichung und p3 der Offset des Rauschens.

Histogramme

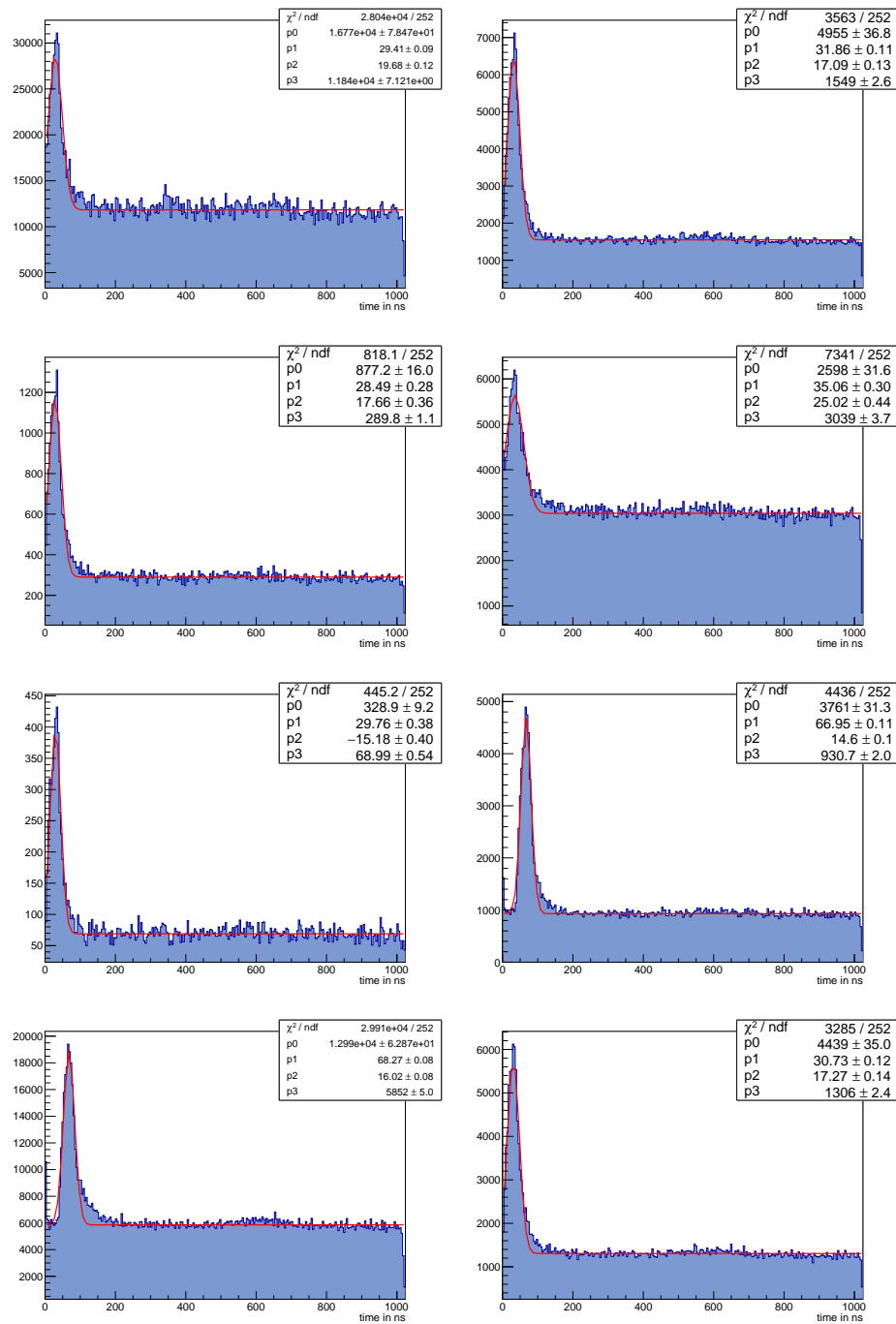


Abbildung 2: Histogramme der zeitlichen Verteilung der Peak-Minima über alle Ereignisse. Von links oben nach rechts unten für die Photomultiplier B5, B6, P7, P8, P9, P10, P11 und B12. In den Histogrammen sind auch die Parameter der Anpassung dargestellt, p_0 ist die Höhe der Gauß-Kurve, p_1 der Mittelwert, p_2 der Standardabweichung und p_3 der Offset des Rauschens.

Tabellen

Photomultiplier	B1	B2	B3	P4	B5	B6	P7	P8	P9	P10	P11	B12
B1		4	4	2	-34	-30	-34	-35	-32	-5	5	-32
B2	2		1	0	-36	-32	-37	-35	-36	3	3	-35
B3	2	2		1	-36	-32	-37	-35	-35	3	4	-34
P4	3	3	3		-35	-31	-35	-35	-33	4	5	-33
B5	41	41	41	40		8	3	10	4	42	43	5
B6	36	35	35	34	-1		-2	5	-1	37	37	0
P7	39	39	40	38	2	5		5	3	41	41	3
P8	42	40	40	41	2	5	3		0	39	38	3
P9	36	39	38	36	0	4	0	3		39	39	3
P10	0	0	0	10	-37	-34	-38	-38	-37		2	-36
P11	2	1	0	0	-36	-32	-37	-38	-35	3		-35
B12	38	37	38	36	0	4	0	3	4	39	39	

Tabelle 1: Mittelwerte der Anpassung einer Gauß-Funktion an die relativen zeitlichen Verteilungen der Peak-Minima aller Photomultiplier. Die Zeilen stellen die Referenz-Photomultiplier dar. Die Werte sind in ns angegeben und auf 0 Stellen gerundet, da die Auflösung des SADC 1 ns ist.

Photomultiplier	B1	B2	B3	P4	B5	B6	P7	P8	P9	P10	P11	B12
B1		6	6	8	10	12	10	12	9	10	11	11
B2	10		8	8	9	11	9	10	9	9	10	10
B3	8	8		7	8	12	7	8	7	9	10	11
P4	10	8	7		8	11	10	8	8	9	10	10
B5	10	8	8	7		12	10	8	8	9	11	11
B6	11	11	11	11	14		14	12	11	12	14	14
P7	12	9	8	9	12	15		8	9	10	12	12
P8	10	8	8	7	8	13	6		14	10	13	10
P9	11	9	8	8	10	12	7	9		8	10	9
P10	11	9	9	9	10	12	10	9	7		9	9
P11	11	9	8	9	11	13	11	9	1	8		10
B12	12	10	11	10	13	14	12	11	8	9	11	

Tabelle 2: Standardabweichungen der Anpassung einer Gauß-Funktion an die relativen zeitlichen Verteilungen der Peak-Minima aller Photomultiplier. Die Zeilen stellen die Referenz-Photomultiplier dar. Die Werte sind in ns angegeben und auf 0 Stellen gerundet, da die Auflösung des SADC 1 ns ist.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau des BGO-OD Experiments	3
2.2	Aufbau der Elektronen-Stretcher-Anlage	4
3.1	Polarisation von Materie durch den Čerenkov-Effekt	7
3.2	Überlagerung von Elementarwellen beim Čerenkov-Effekt	8
3.3	Aufbau eines Photomultipliers	9
4.1	Aufbau des Aerogel-Čerenkov-Detektors	11
4.2	Geplante Position des Aerogel-Čerenkov-Detektors	12
5.1	Test-Position des Aerogel-Čerenkov-Detektors	13
5.2	Einzel-Histogramme der SADC-Daten	15
5.3	Verteilung der Peak-Minima für zufällige Schwellenwerte	16
5.4	Verteilung der Peak-Minima für finale Schwellenwerte	16
5.5	Zeitliche Verteilung der Peak-Minima	17
5.6	Relative zeitliche Verteilung der Peak-Minima	18
5.7	Positionen im Vorwärtsspektrometer	19
5.8	Verhältnis-Histogramm der Positionen im Vorwärtsspektrometer	20
5.9	Projektionen des Verhältnis-Histogramms der Positionen im Vorwärtsspektrometer	20
5.10	Geschwindigkeitsverteilung im Detektorbereich	21
5.11	Verhältnisse von Multiplizität und β	22
5.12	Projektion der Verhältnisse von Multiplizität und β	23
1	Zeitliche Verteilung der Peak-Minima für die Photomultiplier B1 bis B6	33
2	Zeitliche Verteilung der Peak-Minima für die Photomultiplier P7 bis B12	34

Tabellenverzeichnis

5.1	Verwendete Schwellenwerte Photomultiplier	16
5.2	Anpassungsergebnisse an die absoluten zeitlichen Peak-Verteilungen aller Photomultiplier	17
5.3	Anpassungsergebnisse an die relativen zeitlichen Peak-Verteilungen im Bezug auf den Photomultiplier P11	18
5.4	Grenzparameter der Positionen im Vorwärtsspektrometer	19
5.5	Teilchenzahlen über und unter der Grenzgeschwindigkeit	21
5.6	Teilchenzahlen über und unter der Grenzgeschwindigkeit abhängig von Parametern .	23
5.7	Teilchenzahlen-Verhältnisse über und unter der Grenzgeschwindigkeit abhängig von Parametern	25
1	Anpassungs-Mittelwerte an die relativen zeitlichen Peak-Verteilungen aller Photomultiplier	35
2	Anpassungs-Standardabweichungen an die relativen zeitlichen Peak-Verteilungen aller Photomultiplier	36

Danksagungen

Hiermit möchte ich mich bei Professor Hartmut Schmieden für die Gelegenheit, diese interessante Bachelorarbeit in seiner Arbeitsgruppe zu schreiben, bedanken.

Des weiteren möchte ich der gesamten BGO-OD-Arbeitsgruppe für die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit danken.

Besonderer Dank gilt auch Sascha Heider für die freundliche Zusammenarbeit an dem Aergoel-Čerenkov-Detektor.

Zuletzt danke ich Prof. Dr. Bernhard Ketzer für die Übernahme der Zweitkorrektur.