

Inbetriebnahme eines Aerogel-Čerenkov-Detektors für das BGO-OD Experiment

Sascha Heider

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut

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

Januar 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:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das BGO-OD Experiment	3
3	Der Čerenkov-Effekt und seine Anwendung	5
3.1	Čerenkov-Strahlung	5
3.2	Čerenkov-Detektoren	6
3.2.1	Schwellen-Čerenkov-Detektoren	7
3.2.2	Ring-Čerenkov-Detektoren	7
3.3	Photomultiplier	8
4	Der Aerogel-Čerenkov-Detektor	11
4.1	Aufbau und Funktionsprinzip des Detektors	11
4.2	Inbetriebnahme im Labor	12
4.3	Testmessung mit Höhenstrahlung	14
4.3.1	Aufbau	14
4.3.2	Auswertung	15
4.4	Testmessung während der Strahlzeit November/Dezember 2018	23
4.4.1	Vorbereitung und Aufbau für die Testmessungen	23
4.4.2	Auswertung	24
5	Fazit und Ausblick	29
	Literatur	31
A	Anhang	33
A.1	Testmessung mit Höhenstrahlung	33
A.1.1	Aufbau	33
A.1.2	Auswertung	35
A.2	Testmessung während der Strahlzeit November/Dezember 2018	41
A.2.1	Aufbau	41
	Abbildungsverzeichnis	43
	Tabellenverzeichnis	47

Einleitung

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde durch Ernest Rutherford in einfachen Streuversuchen mit Alphateilchen nachgewiesen, dass ein Großteil der Masse eines Atoms in einem kleinen Punkt im Zentrum, dem Atomkern, lokalisiert ist. Wenige Jahre später gelang es die Zusammensetzung des Atomkerns zu präzisieren, nämlich in Bausteine die Proton und Neutron genannt wurden. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ermöglichte es die rasante Weiterentwicklung von Teilchenbeschleunigern und Detektoren die tiefinelastische Streuung von Elektronen an Protonen zu beobachten und so die Substruktur der Nukleonen, die punktförmigen Quarks, zu entschlüsseln.

Heute ist bekannt das Nukleonen ein System aus drei Valenzquarks, den Seequarks und Gluonen darstellen, jedoch herrscht eine Diskrepanz zwischen der modernen theoretischen Beschreibung der Nukleonenstruktur und den experimentellen Beobachtungen. So sagt beispielsweise die Theorie eine große Anzahl von Anregungszuständen voraus die jedoch, trotz großer experimenteller Anstrengungen an verschiedenen Experimenten, bisher nur vereinzelt beobachtet werden konnten. Eine Möglichkeit um Rückschlüsse über die Struktur der Nukleonen zu erlangen besteht darin, ähnlich zur Spektroskopie in der Atomphysik, diese Anregungszustände zu untersuchen. Beim Zerfall dieser Resonanzen entstehen überwiegend Mesonen, deren Untersuchung es erlaubt Informationen über die Dynamiken innerhalb des Systems zu gewinnen.

Ein Experiment zur Untersuchung dieser Resonanzen ist das BGO-OD Experiment, bei dem ein Photonstrahl genutzt wird um Nukleonresonanzen anzuregen. Eine Reihe nachfolgender Detektorsysteme dient dabei zur Beobachtung der Endzustände die aus dem Zerfall dieser Resonanzen resultieren. Ziel der Bachelorarbeit ist es einen Aerogel-Čerenkov-Detektor für das BGO-OD Experiment in Betrieb zu nehmen, welcher den Effekt der Čerenkov-Strahlung nutzt, um eine bessere Diskriminierung von beispielsweise Pionen gegenüber Kaonen zu ermöglichen.

Im folgenden werden zunächst die Grundzüge des BGO-OD Experimentes vorgestellt und anschließend der dem Detektor zugrunde liegende Effekt der Čerenkov-Strahlung und die daraus resultierenden Möglichkeiten zur Teilchendetektion näher erläutert. Nachfolgend wird auf die Inbetriebnahme des Detektors im Labor und Messungen der Ansprechwahrscheinlichkeiten der Photomultiplier des Detektors auf die Čerenkov-Strahlung, welche mit kosmischer Höhenstrahlung durchgeführt wurden, eingegangen. Schließlich wird der Einbau in das BGO-OD Experiment zur Testmessung während einer Strahlzeit und eine erste Auswertung der so gewonnen Daten behandelt.

Das BGO-OD Experiment

Das BGO-OD¹ Experiment ist an der Beschleunigeranlage ELSA² des Physikalischen Institutes der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn angesiedelt und besteht im wesentlichen aus dem BGO-Ball und dem nachfolgenden Vorwärtsspektrometer, welches sich aus verschiedenen Detektoren zusammensetzt. Ein Überblick über den Aufbau des Experimentes kann der [Abbildung 2.1](#) entnommen werden.

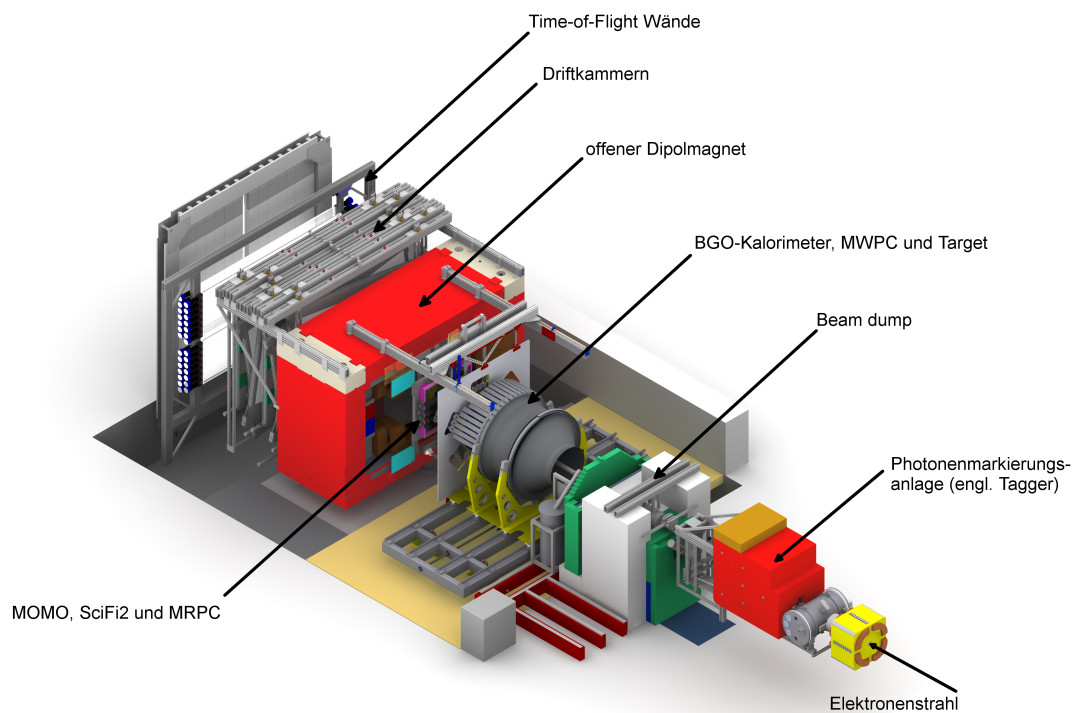


Abbildung 2.1: Schematische Übersicht über das BGO-OD Experiment (aus [1]).

¹ Bismutgermanat ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) - open-dipole

² Elektronen Stretcher Anlage

Photonenstrahl und Photonenmarkierungsanlage

Um Photonen für die Anregung der Resonanzen zu erhalten werden Elektronen der Beschleunigeranlage ELSA mit einer Energie von bis zu 3,5 GeV in die Photonenmarkierungsanlage³ geführt. Dort treffen die Elektronen auf einen Radiator, wobei sie durch das Coulombfeld der Kerne im Radiator abgebremst werden und Bremsstrahlung in Form eines Photons emittieren. Ein Dipolmagnet hinter dem Radiator sorgt dafür, dass die Elektronen entsprechend ihres Impulses durch die Lorenzskraft abgelenkt werden und auf ein aus 120 Szintillatoren bestehendes Hodoskop treffen. Durch die jeweilige Nachweisposition im Hodoskop lässt sich Rückschluss auf die Elektronenenergie und somit auch auf die Energie des erzeugten Photons ziehen. Elektronen, die nicht an der Erzeugung eines Bremsstrahlungsphotons beteiligt sind, werden im beamdump vernichtet [2].

BGO-Ball

Anschließend trifft der Photonenstrahl innerhalb der zentralen Detektoreinheit, dem BGO-Ball, auf ein wahlweise mit flüssigem Wasserstoff oder Deuterium gefülltes zylinderförmiges Target. Um das Target herum befinden sich zur Rekonstruktion der Spur geladener Teilchen zwei Vieldrahtkammern⁴. Zwischen MWPC und dem eigentlichen BGO-Kalorimeter befindet sich zu dem ein Fass aus dünnen Plastiksintillatoren, welches über die Energiedeposition dE/dx innerhalb des Detektormaterials, eine Identifikation des Teilchentypes ermöglicht [3].

Um die MWPC und das Szintillatorfass herum deckt der rugbyballförmige BGO-Ball, bestehend aus 480 BGO-Kristallen, einen Polarwinkelbereich von $25^\circ \leq \theta \leq 155^\circ$ (15 Sektoren) und einen Azimutalwinkelbereich von $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ (32 Sektoren) ab. Dies entspricht einer Raumwinkelabdeckung von circa 90%. Die einzelnen Kristalle besitzen dabei eine Länge von 24 cm was mehr als 21 Strahlungslängen entspricht. Dadurch wird nahezu vollständige Energiedeposition innerhalb des Balls sichergestellt und ermöglicht so eine effiziente Detektion der bei dem Zerfall von Mesonen entstehenden Photonen [4].

Vorwärtsspektrometer

Das Vorwärtsspektrometer dient dazu geladene Teilchen in einem Winkelbereich von $\theta \leq 10^\circ$ nachzuweisen und zu identifizieren. Dazu befinden sich vor dem namensgebenden offenen Dipolmagneten (OD), welcher geladene Teilchen ihrem Impuls entsprechend ablenkt, die beiden Detektoren MOMO⁵ und SciFi⁶. Bei beiden handelt es sich um Detektoren die aus szintillierenden Fasern aufgebaut sind und so eine präzise Bestimmung der Teilchentrajektorie vor dem Magneten ermöglichen. Hinter dem Magneten dienen acht Driftkammern zur Positionsbestimmung der geladenen Teilchen. Aus der Bahnkrümmung die die Teilchen im Magnetfeld erfahren lässt sich so der Impuls dieser rekonstruieren. Schließlich folgen den Driftkammern die ToF⁷-Wände, welche für geladene Teilchen eine Flugzeitmessung und somit auch eine Geschwindigkeitsmessung (β) ermöglichen. Durch Kenntnis des Teilchenimpulses und der Geschwindigkeit β wird so eine Teilchenidentifikation möglich. Eine Möglichkeit eine bessere Unterscheidung der Teilchensorten zu erzielen bietet der im Rahmen dieser Arbeit behandelte Aerogel-Čerenkov-Detektor. Dieser erlaubt es unter Ausnutzung des Čerenkov-Effektes in einem Impulsbereich von bis zu 1 540 MeV eine bessere Diskriminierung der Pionen von den Kaonen und somit eine genauere Teilchenidentifikation zu erzielen.

³ engl. tagger

⁴ engl. **M**ulti-**w**ire **p**roportional **c**hamber

⁵ engl. **M**onitor of **m**esonics **o**bservables

⁶ engl. **S**cintillating **f**ibers

⁷ engl. **T**ime of **f**light

Der Čerenkov-Effekt und seine Anwendung

Im Folgenden werden die physikalischen Konzepte des Phänomens der Čerenkov-Strahlung, sowie die darauf basierenden Möglichkeiten Detektoren zur Teilchenidentifikation zu realisieren, wie auch deren Unterschiede näher erläutert.

3.1 Čerenkov-Strahlung

Als Čerenkov-Strahlung bezeichnet man elektromagnetische Strahlung die entsteht, wenn ein geladenes Teilchen mit einer Geschwindigkeit v durch ein dielektrisches Medium mit Brechungsindex n propagiert und die Geschwindigkeit des Teilchens dabei größer ist als die Lichtgeschwindigkeit $c_n = c/n$ innerhalb des Mediums, wobei c die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist.

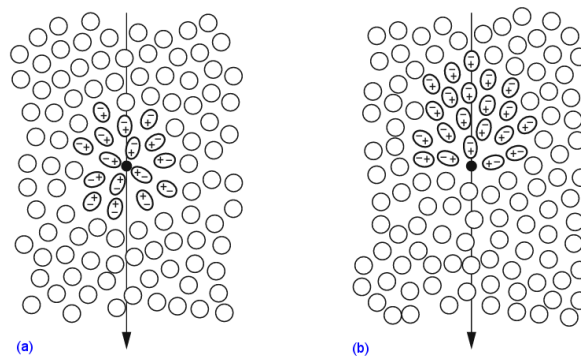


Abbildung 3.1: Veranschaulichung des Durchgangs eines geladenen Teilchens durch ein dielektrisches Medium. (a) Die Geschwindigkeit des Teilchens v ist kleiner als c_n und eine symmetrische Polarisation ist erkennbar. (b) Die Geschwindigkeit ist größer als c_n und die daraus resultierende Polarisation ist asymmetrisch (aus [5]).

Dieser Effekt lässt sich durch die Polarisierbarkeit des dielektrischen Mediums erklären. Durchquert ein geladenes Teilchen das Medium so wechselwirken die Atome mit dem elektrischen Feld des Teilchens und werden auf Grund dessen kurzzeitig polarisiert. Ist dabei die Geschwindigkeit des Teilchens geringer als die Lichtgeschwindigkeit c_n so werden die Atome um das Teilchen herum symmetrisch polarisiert und die so entstandenen elektrischen Dipole heben sich im Mittel auf, sodass keine elektromagnetische Strahlung emittiert wird (Abbildung 3.1 (a)). Ist die Teilchengeschwindigkeit jedoch größer als die Lichtgeschwindigkeit c_n entsteht eine asymmetrische Polarisation des Mediums, da die Atome in Flugrichtung

des Teilchens nicht schnell genug polarisiert werden (Abbildung 3.1 (b)). Durch das so entstehende netto Dipolmoment wird nun entlang der Teilchentrajektorie Dipolstrahlung emittiert [5].

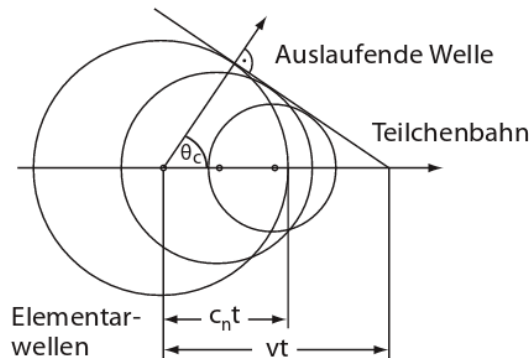


Abbildung 3.2: Darstellung der Ausbildung der Čerenkov-Strahlung unter dem Winkel θ_c (entnommen aus [5]).

Diese entlang der Teilchenbahn abgestrahlten Wellen interferieren konstruktiv unter einem charakteristischen Öffnungswinkel θ_c zu einer Wellenfront. Anhand Abbildung 3.2 ergibt sich für den Öffnungswinkel folgende Beziehung:

$$\cos(\theta_c) = \frac{c_n t}{vt} = \frac{1}{\beta n}, \quad (3.1)$$

wobei $\beta = v/c$ ist.

Aus Gleichung 3.1 lässt sich eine Bedingung für die Schwellengeschwindigkeit herleiten, ab der Čerenkov-Strahlung emittiert wird. Da der Kosinus nur die Werte $\cos(\theta_c) \leq 1$ annehmen kann ergibt sich somit für die Schwellengeschwindigkeit β_{th} , oberhalb derer Čerenkov-Strahlung emittiert wird, folgende Relation:

$$\beta_{th} = \frac{1}{n}. \quad (3.2)$$

Für die Anzahl der in einem Čerenkov-Radiator emittierten Photonen pro Wellenlänge λ gilt:

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{2\pi z^2 \alpha}{\lambda^2} L \sin^2(\theta_c), \quad (3.3)$$

wobei z die Ladungszahl, α die Feinstrukturkonstante und L die Dicke des Čerenkov-Radiators ist. Die Anzahl der durch den Čerenkov-Effekt erzeugten Photonen ist also proportional zu $1/\lambda^2$, sodass überwiegend Photonen mit einer Wellenlänge im nahen UV-Bereich (315 bis 400 nm) beziehungsweise im unteren optischen Bereich (400 bis 450 nm) die Čerenkov-Strahlung dominieren [5].

3.2 Čerenkov-Detektoren

Die Čerenkov-Strahlung eignet sich auf Grund ihrer Geschwindigkeitsabhängigkeit (Gleichung 3.2) und der Eigenschaft das die Strahlung in einem charakteristischen Kegel in Flugrichtung emittiert wird besonders zur Detektion und Unterscheidung verschiedener Teilchen. Dabei kann zwischen Detektoren unterschieden werden die lediglich die emittierte Čerenkov-Strahlung nachweisen, wohingegen andere Bauarten darauf abzielen die in einem Kegel ausgesandte Strahlung als abgebildeten Ring auf

einem Detektor nachweisen [5]. Im folgenden werden kurz beide auf dem Čerenkov-Effekt beruhende Detektortypen vorgestellt.

3.2.1 Schwellen-Čerenkov-Detektoren

Unter Auswahl eines geeigneten Radiatormaterials ermöglicht die Schwellengeschwindigkeit den Bau eines sogenannten Schwellen-Čerenkov-Detektors. Dieser erlaubt es bei gegebenem Impuls zwei Teilchensorten von unterschiedlicher Masse, dass heißt unterschiedliche Teilchengeschwindigkeiten, von einander zu trennen. Dazu wird das Radiatormaterial so gewählt, dass eines der Teilchen beim Durchgang durch den Radiator Čerenkov-Strahlung emittiert, welche beispielsweise über einen Photomultiplier nachgewiesen werden kann, das andere jedoch nicht. Typischerweise werden Gase wie Fluorkohlenwasserstoffe (CF_4 mit $n = 1,0005$) oder Festkörper und Flüssigkeiten wie zum Beispiel Plexiglas ($n = 1,49$) als Radiatormaterial verwendet. Der Brechungsindexbereich zwischen beiden Stofftypen ist mit natürlichen Materialien nicht zugänglich und kann durch sogenannte Aerogele abgedeckt werden. Dabei handelt es sich um einen hochporösen Festkörper der im wesentlichen aus aufgeschäumtem Siliziumdioxid (SiO_2) besteht. Durch Variation der Porengröße innerhalb des Aerogels kann die Dichte und somit auch der Brechungsindex im Herstellungsprozess eingestellt werden. Dadurch lassen sich Brechungsindizes im Bereich von 1,0007 bis 1,24 und somit auch Schwellengeschwindigkeiten β_{th} im Bereich von 0,9993 bis 0,8064 realisieren [5].

Schwellen-Čerenkov-Detektoren besitzen den Vorteil, dass sie in ihrer Bauweise sehr kompakt und kosteneffizient gebaut werden können. Ein Nachteil ist jedoch, dass durch die Bauweise nur Teilchen in einem bestimmten Impulsbereich unterschieden werden können. Wählt man als Radiatormaterial ein Aerogel mit dem Brechungsindex $n = 1,05$ so ergeben sich für Pionen, Kaonen und Protonen die in [Tabelle 3.1](#) aufgeführten Schwellengeschwindigkeiten β_{th} und Impulse p_{th} . Wird also in einem Schwellen-Čerenkov-Detektor ein Aerogel mit $n = 1,05$ als Radiator verwendet, so lassen sich in einem Impulsbereich von 0,436 bis 1,542 GeV Pionen von Kaonen durch den Nachweis der durch die Pionen erzeugten Čerenkov-Strahlung unterscheiden.

Radiatormaterial	n	β_{th}	$p_{\text{th}} / \text{GeV } c^{-1}$		
			π^\pm	K^\pm	p
CF_4	1,0005	0,9995	4,414	15,610	29,668
Aerogel	1,05	0,9524	0,436	1,542	2,931
Plexiglas	1,49	0,6711	0,126	0,447	0,849

Tabelle 3.1: Schwellengeschwindigkeit und Impuls für ein Aerogel mit Brechungsindex $n = 1,05$. Als Vergleich sind desweiteren die Schwellen für Plexiglas mit $n = 1,49$ und CF_4 mit $n = 1,0005$ aufgeführt.

3.2.2 Ring-Čerenkov-Detektoren

In RICH¹-Detektoren wird im Gegensatz zu den Schwellen-Čerenkov-Detektoren nicht nur die Strahlung an sich, sondern auch der Winkel θ_c unter dem diese emittiert wird zur Teilchenidentifikation genutzt. Dazu wird die in einem Kegel ausgesandte Čerenkov-Strahlung mittels einer fein abgestimmten Optik, beispielsweise unter Verwendung sphärischer Spiegel, auf eine Ebene mit Photodetektoren zu einem sogenannten Čerenkov-Ring abgebildet (siehe [Abbildung 3.3](#)).

¹ Ring Imaging Cherenkov Counters

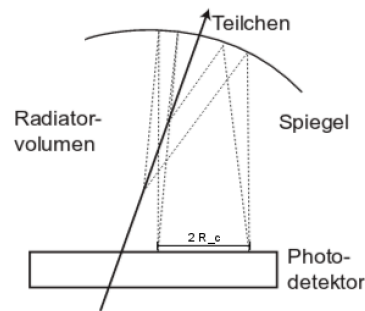


Abbildung 3.3: Schematisch Darstellung des Funktionsprinzips eines Ring-Čerenkov-Detektors (entnommen aus [5]).

Aus dem gemessenen Ringradius R_c lässt sich dann der Čerenkov-Winkel θ_c und somit nach Gleichung 3.1 die Geschwindigkeit des Teilchens bestimmen. Wird zusätzlich mit einem Impulsspektrometer der Impuls gemessen lässt sich schließlich die Masse des Teilchens eindeutig identifizieren (Gleichung 3.4 aus [5]).

$$m = \frac{p}{c} \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1} = \frac{p}{c} \sqrt{(n \cos(\theta_c))^2 - 1} \quad (3.4)$$

Neben den herkömmlichen RICH-Detektoren finden in modernen Großexperimenten, wie beispielsweise an dem in Darmstadt angesiedelten PANDA²-Experiment, DIRC³-Detektoren ihre Anwendung. Als Radiatormaterial dient hier Quarzglas, welches so angeordnet und bearbeitet wird, dass die durch den Čerenkov-Effekt entstandenen Photonen durch Totalreflexion aus der Teilchenbahn heraus und auf einen Photodetektor zur Rekonstruktion der Čerenkov-Ringe geleitet werden [5]. Der Vorteil der DIRC-Detektoren gegenüber herkömmlichen RICH-Detektoren besteht darin, dass diese auf aufwendige Optiken verzichten können und somit kompakter sind [7]. Im Vergleich zu Schwellen-Čerenkov-Detektoren stellen sowohl RICH- als auch DIRC-Detektoren größere Anforderungen an die benötigten Photodetektoren, da eine gute Auflösung der auf den Detektor abgebildeten Čerenkov-Ringe für diese Detektoren essentiell ist.

Für die bessere Unterscheidung von Pionen und Kaonen am BGO-OD Experiment fällt die Wahl auf einen Schwellen-Čerenkov-Detektor, da er sich auf Grund seiner noch kompakteren Bauweise im Vergleich zu DIRC- beziehungsweise RICH-Detektoren am einfachsten in den bereits bestehenden Aufbau des BGO-OD Experimentes integrieren lässt.

Sowohl Schwellen-Čerenkov-, als auch RICH- beziehungsweise DIRC-Detektoren benötigen photosensitive Detektoren zum Nachweis der Čerenkov-Strahlung. Eine Möglichkeit bildet hier die Verwendung von Photomultipliern deren Aufbau und Funktionweise im folgenden Abschnitt erläutert wird.

3.3 Photomultiplier

Photomultiplier sind in der Kategorie der Photodetektoren einzuordnen, welche im wesentlichen zum Nachweis von Licht dienen. Photomultiplier zeichnen sich dabei durch ihre große Verstärkung, typischerweise im Bereich von 10^5 – 10^7 und der Möglichkeit selbst einzelne Photonen zu detektieren aus. In

² antiProton ANnihilations at DArmstadt: Das PANDA-Experiment wird durch Antiproton-Proton-Annihilation Fragen unter anderem im Bereich der Hadronenspektroskopie untersuchen [6].

³ Detection of Internally Reflected Čerenkovlight

Abbildung 3.4 ist schematisch der Aufbau und die Funktionsweise eines Photomultipliers skizziert.

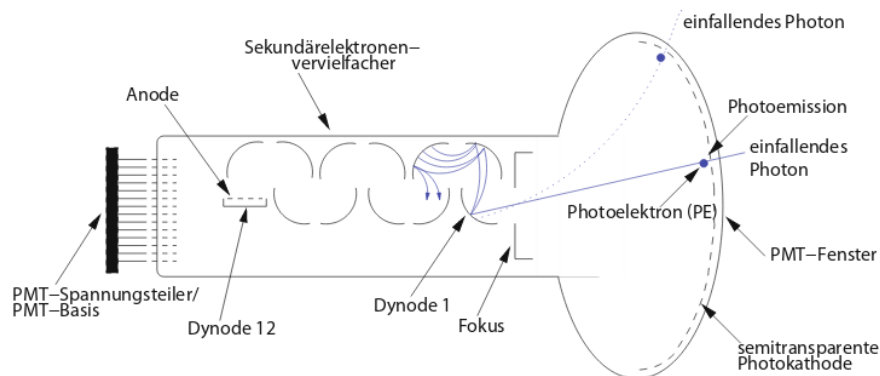


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Photomultipliers (aus [5]).

Trifft ein Photon, welches beispielsweise durch Čerenkov-Strahlung erzeugt wurde, auf die Photokathode des Photomultipliers auf so kann durch Energieübertrag ein Elektron aus der Photokathode herausgelöst werden (photoelektrischer Effekt). Durch eine an der Basis angelegte Hochspannung und der daraus resultierenden (anwachsenden) Potentialdifferenz zwischen der Kathode, über die einzelnen Dynoden hin zur Anode wird das Elektron zur ersten Dynode beschleunigt. Dort löst es weitere Elektronen aus dem Dynodenmaterial heraus. Dieser Prozess der Sekundärelektronenvervielfachung findet an den nachfolgenden Dynoden erneut statt, sodass an der Anode schließlich durch die eintreffende Elektronenkaskade ein makroskopisch messbares elektrisches Signal zur Verfügung steht.

Der Aerogel-Čerenkov-Detektor

Bei dem Aerogel-Čerenkov-Detektor handelt es sich um einen Schwellen-Čerenkov-Detektor. Detektoren dieser Art ermöglichen es, wie bereits in [Unterabschnitt 3.2.1](#) erläutert, durch den Čerenkov-Effekt verschiedene Teilchensorten, wie beispielsweise Kaonen und Pionen, voneinander zu trennen. In diesem Kapitel wird auf den Aufbau und die Funktionsweise des Detektors, die Funktionsfähigkeit nach längerer Lagerungszeit und Testmessungen die, sowohl im Labor mittels Höhenstrahlung, als auch am BGO-OD Experiment selbst durchgeführt wurden eingegangen.

4.1 Aufbau und Funktionsprinzip des Detektors

Bei dem für das BGO-OD Experiment in Betrieb zu nehmenden Aerogel-Čerenkov-Detektor handelt es sich um einen Schwellen-Čerenkov-Detektor. Dieser besteht aus einer lichtdichten $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ großen Box mit einer Tiefe von 27 cm an deren Seite jeweils drei Photomultiplier des Typs Burle 8854 oder Philips XP 2041 angeordnet sind (siehe [Abbildung 4.1](#)). Die Photomultiplier der Firma Philips können dabei mit einer maximalen Hochspannung von $+3\text{ kV}$ betrieben werden und besitzen, in dem für die Čerenkov-Strahlung relevanten Wellenlängenbereich, eine Quanteneffizienz¹ von 25% (bei $\lambda = 400\text{ nm}$). Für die Photomultiplier der Firma Burle, welche eine Quanteneffizienz von $22,5\%$ (bei $\lambda = 385\text{ nm}$) besitzen, liegt die maximale Hochspannung bei -3 kV . Die beiden Photomultipliertypen besitzen jeweils an der Seite der Photokathode einen Durchmesser von rund 13 cm [8] [9]. Des Weiteren verfügt der aus der Box herausragende Teil der Photomultiplier über eine Mu-Metall-Abschirmung, welche als Abschirmung externer magnetischer Störfelder dient.

Als Čerenkov-Radiator wird ein Aerogel mit einem Brechungsindex von $n = 1,05$ verwendet. Das Aerogel, welches in Ziegelform zu einer mehrschichtigen Wand (siehe [Abbildung 4.2](#)) von $47\text{ cm} \times 47\text{ cm}$ und einer Stärke von 5 cm angeordnet ist, ruht dabei auf einer in der vorderen Innerenseite der Box aufgespannten Drahtkonstruktion. Durchquert nun ein Teilchen den Detektor mit einer Geschwindigkeit β die größer ist, als die Schwellengeschwindigkeit $\beta_{\text{th}} = 0,9524$, so wird Čerenkov-Strahlung emittiert. Diese wird über eine im Inneren der Box aufgetragene diffus reflektierende Farbe im Detektorvolumen verteilt. Der Nachweis der Čerenkov-Strahlung erfolgt über die zwölf Photomultiplier, die durch ihren großen Durchmesser eine möglichst große Fläche im Inneren des Detektors abdecken. Dies ermöglicht zusammen mit der hohen Quanteneffizienz der Photomultiplier, im dominierenden Wellenlängenbereich der Čerenkov-Strahlung, einen effektiven Nachweis dieser.

¹ Die Quanteneffizienz gibt dabei an mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Photon das auf die Photokathode trifft ein Elektron durch den photoelektrischen Effekt aus dieser heraus löst.

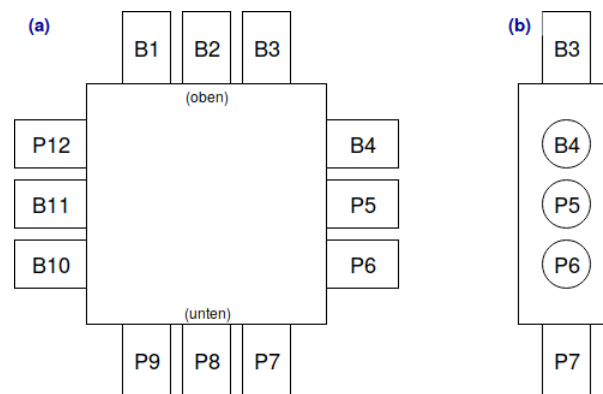


Abbildung 4.1: (a) Schematische Frontansicht des Detektors. (b) Schematische Seitenansicht des Detektors. Die Bezeichnung B steht dabei für Photomultiplier der Firma Burle respektive P für die der Firma Philips. Die im weiteren Verlauf verwendeten Bezeichnungen entsprechen der Anordnung aus (a).

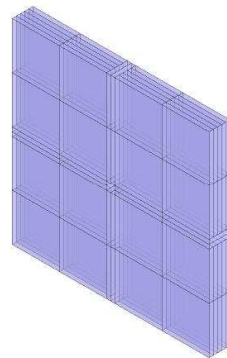


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Aerogelwand (entnommen aus [10]).

4.2 Inbetriebnahme im Labor

Um den Detektor auf eventuelle Schäden an der Aerogelwand zu untersuchen wurde zunächst die auf der Vorderseite des Detektors angebrachte Lichtschutzfolie und anschließend die vordere Detektorwand entfernt. Beim Betrachten der Aerogelwand konnten Risse in einzelnen Aerogelziegeln festgestellt werden, die vermutlich durch die lange Lagerungszeit entstanden sind. Die Risse in der Aerogelwand sollten jedoch keine Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit des Detektors ausüben, da Teilchen beim Durchgang durch die Aerogelwand nur in einem vernachlässigbarem kleinen Wegstück (Rissbreite < 1 mm) keine Čerenkov-Strahlung emittieren.

Nach Schließung des Detektors und dem erneuten Anbringen einer Lichtschutzfolie wurde der Detektor um 90° in die Horizontale gedreht, um die kosmische Höhenstrahlung für die weitere Untersuchung zu nutzen. Höhenstrahlung ist hier von Interesse, da sie auf der Erdoberfläche überwiegend aus Myonen besteht die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit propagieren und so beim Durchgang durch den Detektor Čerenkov-Licht erzeugen, welches von den Photomultipliern nachgewiesen werden kann.

Anschließend wurden die einzelnen Photomultiplier auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft. Dazu wurde jeweils der BNC-Ausgang des Photomultipliers mit einem Oszilloskop verbunden und an den HV-Eingang eine Spannung von $\pm 2,1$ kV je nach Typ angelegt. In [Abbildung 4.3](#) und [Abbildung 4.4](#) sind exemplarisch die Signale der unterschiedlichen Photomultipliertypen dargestellt. Man erkennt anhand von [Abbildung 4.3](#), dass die Detektoren der Firma Philips, sowohl eine geringere Signaldauer, als auch

Anstiegszeit im Vergleich zu denen der Firma Burle besitzen, was jedoch für den Einsatz in einem Schwellen-Čerenkov-Detektor nicht von Bedeutung ist.

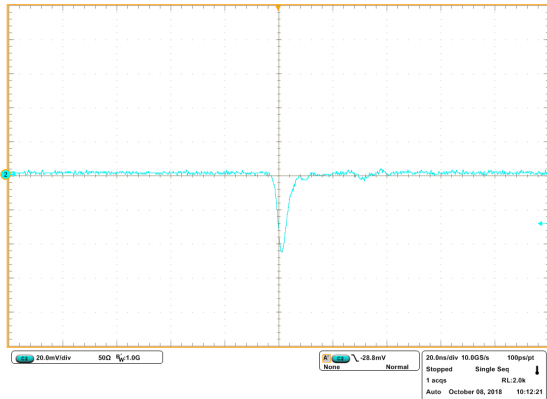


Abbildung 4.3: Oszillogramm des Photomultiplersignals des Photomultipliers P12 bei einer eingestellten Hochspannung von 2,1 kV mit 20 mV/div und 20 ns/div.

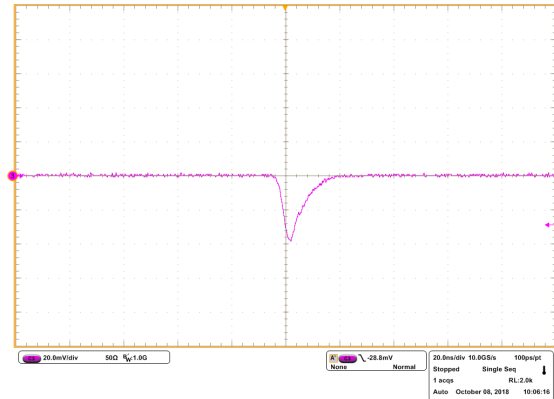


Abbildung 4.4: Oszillogramm des Photomultiplersignals des Photomultipliers B4 bei einer eingestellten Hochspannung von -2,1 kV mit 20 mV/div und 20 ns/div.

Bei der Überprüfung aller zwölf Photomultiplier konnte eine Auffälligkeit an P8 festgestellt werden, welcher im Vergleich mit den anderen Photomultiplern äußerst viele Signale mit langen Pulsausläufern ausgibt (siehe [Abbildung 4.5](#)). Für Hochspannungen größer als 2,1 kV konnte eine starke Zunahme des Rauschverhaltens beobachtet werden. Da dieses Verhalten selbst nach Abdeckung des gesamten Detektors mittels einer schwarzen Plane zur Abschirmung von Tageslicht immer noch zu beobachten war, liegt vermutlich ein Problem innerhalb des Spannungsteilers der Photomultiplierbasis vor, woraus ein stark von den anderen Photomultiplern des selben Typs abweichendes Verstärkungsverhalten resultiert.

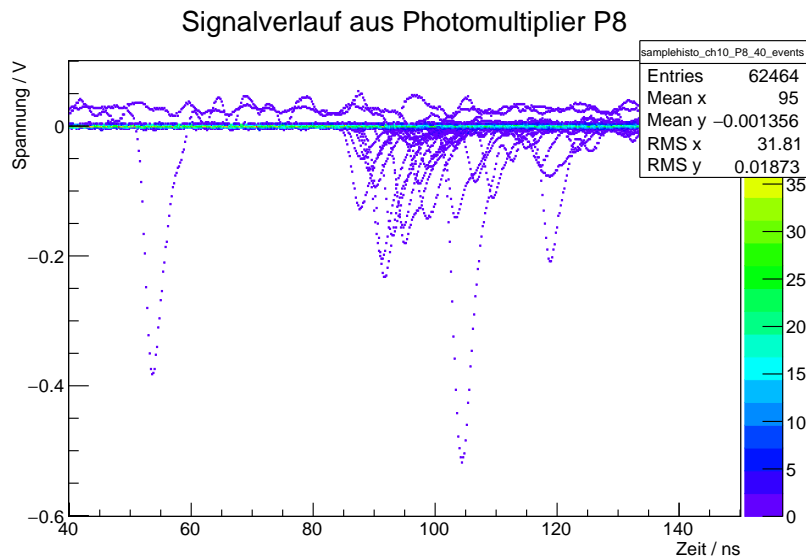


Abbildung 4.5: Signalverhalten des Photomultipliers P8 bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Besonders auffällig ist der Signalanteil oberhalb der Nulllinie, dessen Ursprung in einem Masseproblem liegen könnte.

4.3 Testmessung mit Höhenstrahlung

Anschließend wurde das Ansprechverhalten der Photomultiplier auf das Čerenkov-Licht, welches von Myonen der Höhenstrahlung beim Durchgang durch den Detektor erzeugt wird, untersucht. Die zu Grunde liegende Idee dahinter ist, beim Durchgang eines Myons durch den Detektor ein Triggersignal mittels zweier Szintillationsdetektoren ober- und unterhalb des Detektors zu erzeugen. Das Triggersignal wird dazu genutzt eine Auslese der Photomultiplier-Signale zu starten, da so mit großer Wahrscheinlichkeit sicher gestellt ist, dass Čerenkov-Strahlung innerhalb des Detektors durch das Myon erzeugt wurde. Dazu wurde der in [Abbildung 4.6](#) dargestellte Aufbau realisiert und daraufhin die so gewonnenen Daten analysiert.

4.3.1 Aufbau

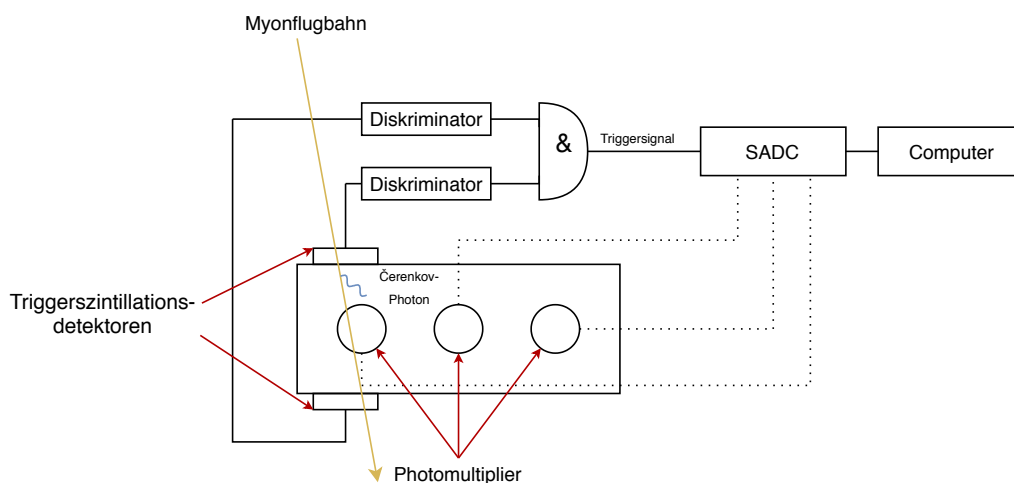


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Charakterisierung der Photomultiplier mittels kosmischer Höhenstrahlung.

Um das Ansprechverhalten der Photomultiplier zu charakterisieren werden die einzelnen Photomultiplier-Signale beim Nachweis der Čerenkov-Strahlung mittels Sampling-Analog-to-Digital-Converter² (SADC) aufgenommen. Dieser tastet, nachdem ein Triggersignal die Messung gestartet hat, in 1024 Schritten die an den Eingängen anliegenden Signale der Photomultiplier ab und speichert diese. Bei einer eingestellten Samplingrate von 5 GS/s wird das Signal so alle 0,2 ns abgetastet. Das Triggersignal gewährleistet dabei, dass das Signal der Photomultiplier nur dann gemessen wird, wenn innerhalb des Detektors auch Čerenkovstrahlung erzeugt wurde. Um ein Triggersignal für den SADC zu erzeugen wurde ober- und unterhalb einer Ecke des Detektors jeweils ein Szintillationsdetektor platziert. Die Ausleseausgänge beider Detektoren wurden jeweils mit einem Diskrimminatorkanal verbunden und anschließend die beiden Signale in ein Koinzidenzmodul geführt, dessen Ausgang das Triggersignal für den SADC bereitstellt. Die Photomultiplier beider Szintillationsdetektoren wurden dabei mit einer Spannung von $-1,6\text{ kV}$ ³ betrieben. Als Diskrimminatorschwelle wurde für beide Kanäle eine Schwelle von -40 mV gewählt, um beispielsweise thermisches Rauschen innerhalb der Photomultiplier zu

² Verwendet wurde der SADC DT5742 der Firma CAEN

³ Dieser Hochspannungswert wurde von Georg Scheluchin, Doktorand der Arbeitsgruppe Schmieden, für diese Photomultiplier empfohlen.

unterdrücken und so Fehlsignale zu vermeiden. Durchquert nun ein Myon beide Triggerszintillatoren und den Čerenkov-Detektor so ist bei einem am Ausgang des Koinzidenzmodul anliegenden positiven Logikpuls (Triggersignal) sichergestellt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Čerenkov-Strahlung innerhalb des Detektors erzeugt wurde. Ein Beispieloszillogramm der Eingangssignale des SADC kann der [Abbildung 4.7](#) entnommen werden.

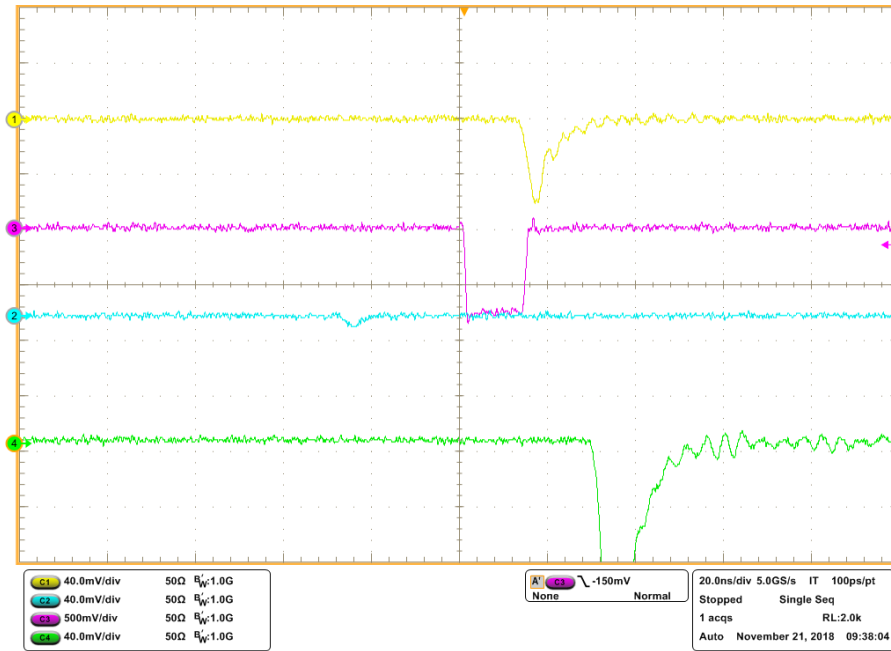


Abbildung 4.7: Oszillogramm des Triggersignals (CH3) und der Signale der Photomultiplier B4 (CH1), B1 (CH4) und P12 (CH2) bei einer eingestellten Hochspannung von $\pm 2,4$ kV und Triggerszintillatorposition *d*. Auffällig ist hier das Signal aus Photomultiplier P12, welches mit circa 10 mV eine im Vergleich zu den Signalen der Photomultiplier B4 und B1 eine geringere Amplitude besitzt. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Photokathode von P12 in diesem Event nur von wenigen Photonen getroffen worden ist.

Desweiteren wurden die Ausgänge der Photomultiplier des Aerogel-Čerenkov-Detektors an die Signaleingänge des SADCs angeschlossen und die Photomultiplier mit ihrer entsprechenden Hochspannung versorgt. Da nur eine begrenzte Anzahl an Hochspannungskanälen im Labor zur Verfügung stand konnten in jeder Messung nur die Signale von drei Photomultipliern gemessen werden. Anschließend wurden die Signale der zwölf Photomultiplier für jede Triggerszintillatorposition (siehe [Abbildung A.1](#)) bei einer Spannung von $\pm 2,1$ kV für 2500 Triggerevents gemessen. Zu dem wurden Messungen mit Hochspannungen im Bereich von $\pm 1,85$ bis $\pm 2,5$ kV für verschiedene Photomultiplier durchgeführt, um das Ansprechverhalten der Photomultiplier in Abhängigkeit der Spannung untersuchen zu können.

4.3.2 Auswertung

Die so gemessenen Signale wurden anschließend mit dem Softwareframework ROOT analysiert und die minimale Ansprechwahrscheinlichkeit ϵ_{\min} der einzelnen Photomultiplier auf die Čerenkov-Strahlung bestimmt. Diese gibt dabei an wie oft die einzelnen Photomultiplier Čerenkov-Strahlung, die durch Myonen der Höhenstrahlung an der Position der Triggerszintillatoren erzeugt wurde, nachweisen konnten. Die minimale Ansprechwahrscheinlichkeit ist also das Verhältnis zwischen der Anzahl der Signale eines Photomultipliers die als Čerenkov-Strahlung identifiziert wurden N_C und der Gesamtanzahl der

Čerenkov-Strahlung erzeugenden Events (Triggerevents) N_G (Gleichung 4.1). Dabei ist die minimale Ansprechwahrscheinlichkeit nicht zu verwechseln mit Effizienz eines Photomultipliers die beispielsweise aussagt mit welcher Wahrscheinlichkeit Elektronen durch Photonen aus der Photokathode herausgelöst werden, oder mit welcher Wahrscheinlichkeit Photoelektronen die Anode des Photomultipliers erreichen und so ein Signal erzeugen.

$$\epsilon_{\min} = \frac{N_C}{N_G} \quad (4.1)$$

Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit

Um N_C zu ermitteln wurde für jeden Photomultiplier einer Messung zunächst die Signalamplitude für alle der 2500 Events bestimmt. Liegt die Amplitude eines Signals über einer gewissen Schwelle U_{schw} so wird dies als Registration der Čerenkov-Strahlung, welche an der Position der Triggerszintillatoren erzeugt wurde, gewertet und das Ereignis zu N_C hinzugezählt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst eine konstante Schwelle $U_{\text{schw}} = 30 \text{ mV}$ zur Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit der einzelnen Photomultiplier bei einer eingestellten Hochspannung von 2,1 kV für die verschiedenen Triggerpositionen gewählt. Die Schwelle wurde dabei bewusst zu 30 mV gewählt, da dies in kommerziell erwerblichen Diskriminatorsmodulen häufig der unteren Grenze der einstellbaren Diskriminatorschwelle entspricht. In [Abbildung 4.8](#) bis [Abbildung 4.11](#) sind die so bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeit der einzelnen Photomultiplier grafisch dargestellt. Die Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie deren Unsicherheiten, aller Messungen können der [Tabelle A.1](#) bis [Tabelle A.4](#) entnommen werden⁴.

Anhand der für die unterschiedlichen Triggerpositionen aufgetragenen Ansprechwahrscheinlichkeiten ist erkennbar, dass Photomultiplier die sich näher am Entstehungsort der Čerenkov-Strahlung (Triggerposition) befinden eine höhere Nachweiswahrscheinlichkeit dieser besitzen. Photomultiplier die eine größere Distanz zu der jeweiligen Position der Triggerszintillatoren besitzen weisen eine deutlich geringere, jedoch von Null verschiedene Ansprechwahrscheinlichkeiten auf. Der Grund dafür ist, dass die im Inneren des Detektors aufgetragene diffus reflektierende Farbe dafür sorgt, dass beispielsweise bei Triggerposition a erzeugte Čerenkov-Photonen zu Detektor P6 gelangen und dort nachgewiesen werden können. Desweiteren ist aus den so aufgetragenen Ansprechwahrscheinlichkeiten ersichtlich, dass unabhängig von der Triggerposition der Photomultiplier P8 ein äußerst hohes Ansprechverhalten besitzt, was ein weiteres Indiz für ein Abweichen des regulären Verstärkungsverhalten ist.

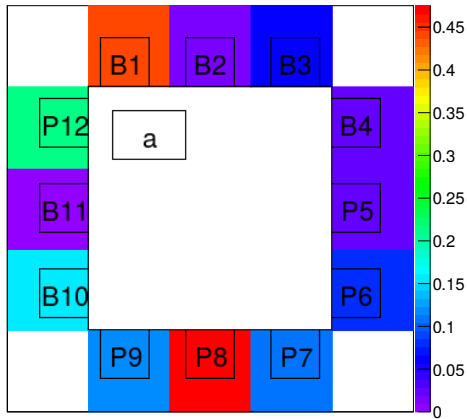
Abhängigkeit der Ansprechwahrscheinlichkeit von der Hochspannung

Da wie in [Unterabschnitt 4.3.1](#) bereits erwähnt für ausgewählte Photomultiplier die Hochspannung, während den Testmessungen mit Höhenstrahlung, variiert wurde, lässt sich dadurch die Abhängigkeit des Ansprechverhaltens von der Hochspannung untersuchen. In [Abbildung 4.12](#) ist exemplarisch für die beiden unterschiedlichen Photomultipliertypen die Ansprechwahrscheinlichkeit für verschiedene Hochspannungen aufgetragen. Als Schwelle wurde hier ebenfalls 30 mV gewählt und die Triggerszintillatoren befanden sich in Position d .

Für den Photomultiplier des Typs Burle musste auf Grund der nur wenigen zur Verfügung stehenden negativen Hochspannungskanäle und der bevorstehenden Strahlzeit für das BGO-OD Experiment auf Messungen für die Hochspannungen im Bereich von 2,2 bis 2,3 kV verzichtet werden.

⁴ In [Abbildung 4.8](#) bis [Abbildung 4.11](#) wurde im Falle einer Mehrfachmessung eines Photomultipliers bei 2,1 kV immer der erste Wert in die Abbildungen eingetragen.

Ansprechwahrscheinlichkeiten der Photomultiplier mit Triggerposition a und einer Schwelle von 30 mV



Ansprechwahrscheinlichkeiten der Photomultiplier mit Triggerposition b und einer Schwelle von 30 mV

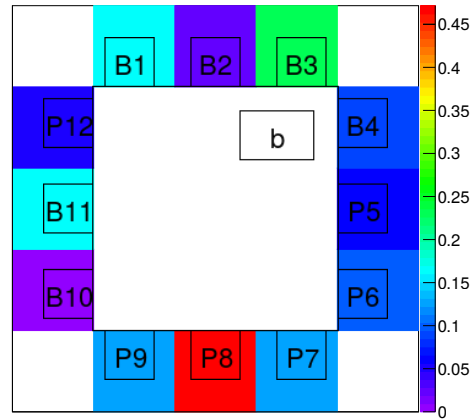
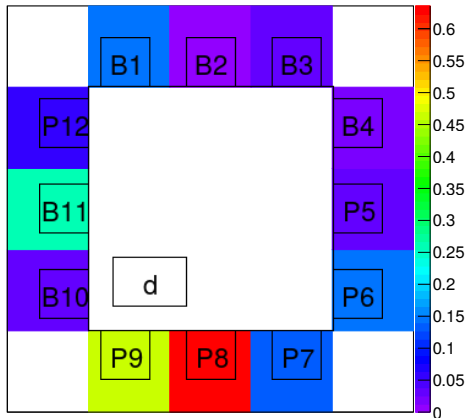


Abbildung 4.8: Ansprechwahrscheinlichkeit der Photomultiplier für Triggerposition *a* bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Die Farbe der zu den Photomultipliern korrespondierenden Felder gibt dabei die Ansprechwahrscheinlichkeit entsprechend der Farbskala auf der rechten Seite an.

Abbildung 4.9: Ansprechwahrscheinlichkeit der Photomultiplier für Triggerposition *b* bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Die Farbe der zu den Photomultipliern korrespondierenden Felder gibt dabei die Ansprechwahrscheinlichkeit entsprechend der Farbskala auf der rechten Seite an.

Ansprechwahrscheinlichkeiten der Photomultiplier mit Triggerposition d und einer Schwelle von 30 mV



Ansprechwahrscheinlichkeiten der Photomultiplier mit Triggerposition c und einer Schwelle von 30 mV

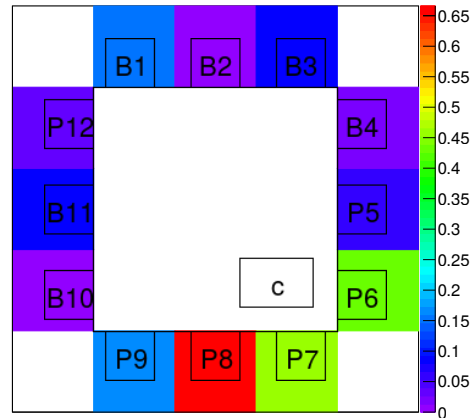


Abbildung 4.10: Ansprechwahrscheinlichkeit der Photomultiplier für Triggerposition *d* bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Die Farbe der zu den Photomultipliern korrespondierenden Felder gibt dabei die Ansprechwahrscheinlichkeit entsprechend der Farbskala auf der rechten Seite an.

Abbildung 4.11: Ansprechwahrscheinlichkeit der Photomultiplier für Triggerposition *c* bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Die Farbe der zu den Photomultipliern korrespondierenden Felder gibt dabei die Ansprechwahrscheinlichkeit entsprechend der Farbskala auf der rechten Seite an.

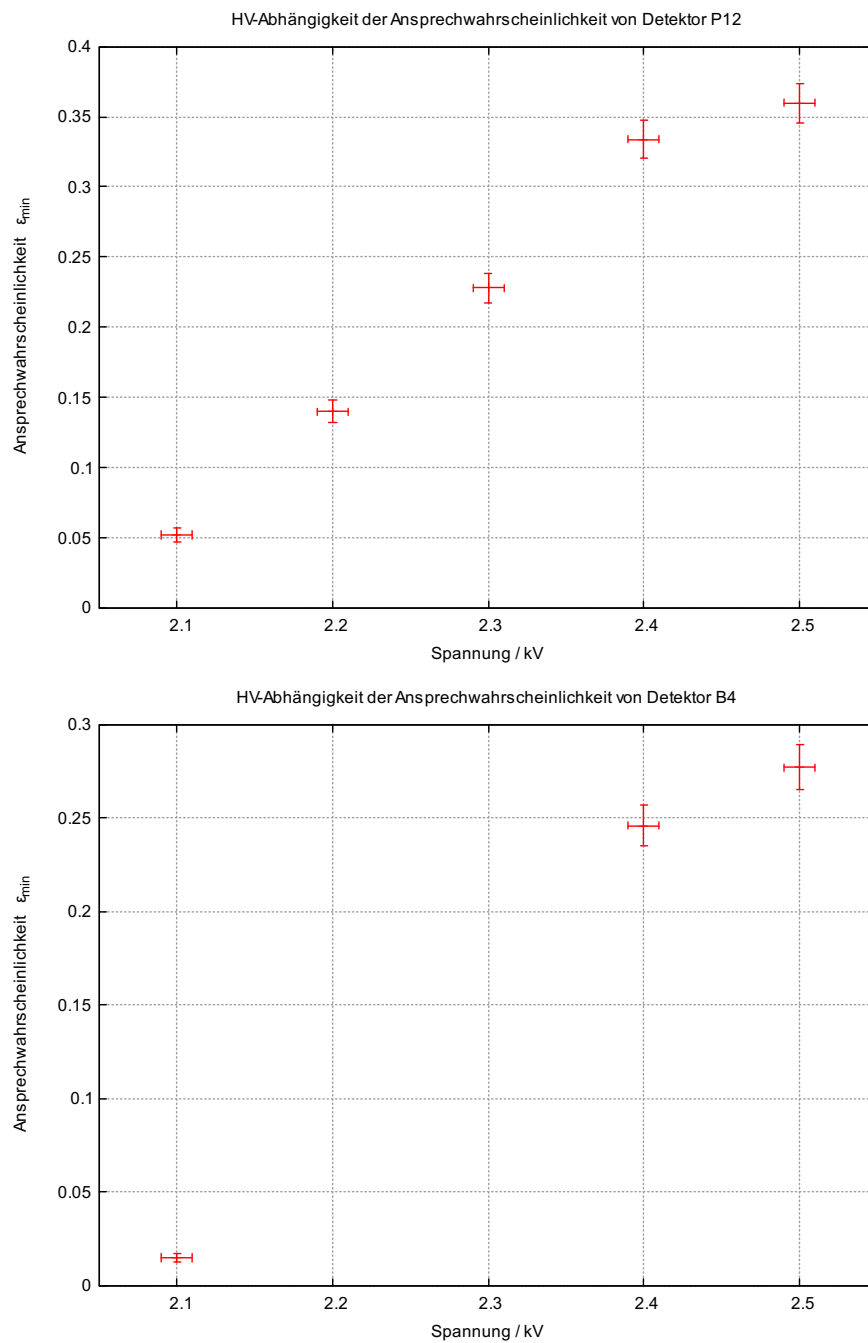


Abbildung 4.12: Ansprechwahrscheinlichkeiten der Photomultiplier P12 und B4 auf die Čerenkov-Strahlung in Abhängigkeit der angelegten Hochspannung. Die Triggerszintillatoren befanden sich in Position d und als Schwelle wurde 30 mV gewählt. Die Unsicherheit der Ansprechwahrscheinlichkeit wurde nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung gemäß Gleichung 4.1 berechnet und die der Hochspannung wurde zu $\pm 0,05$ kV abgeschätzt, da die Hochspannung im Verlauf einer Messung leicht vom ursprünglich eingestellten Wert abwich.

Abbildung 4.12 zeigt sowohl für Photomultiplier der Firma Burle, als auch für die der Firma Philips, dass die Ansprechwahrscheinlichkeiten der Photomultiplier auf die Čerenkov-Strahlung mit steigender Hochspannungen zunächst zunimmt. Für Spannungen größer als 2,5 kV scheint der Verlauf ein Plateau zu erreichen. Dies ist für Photomultiplier charakteristisch, da die Verstärkung dieser mit steigender Hochspannung wächst, sodass selbst Signale bei denen nur einzelne Elektronen aus der Photokathode heraus gelöst und anschließend im Photoelektronenvervielfacher verstärkt werden über die Schwelle von 30 mV gelangen. Wird also die Photokathode in einem Event von nur wenigen oder gar einzelnen Photonen der Čerenkov-Strahlung getroffen, so wird bei ausreichend hoher Spannung das daraus resultierende Signal groß genug um über die Schwelle von 30 mV zu gelangen. Das Event wird dann also zur Anzahl der als Čerenkov-Strahlung registrierten Signale N_C hinzugezählt. Nach Gleichung 4.1 ergibt sich somit schließlich eine höhere Ansprechwahrscheinlichkeit. Aus Abbildung 4.12 ist ersichtlich, dass bei einer eingestellten Hochspannung von 2,5 kV das Plateau noch nicht erreicht ist, sprich die Verstärkung der beiden Photomultipliertypen ist bei dieser Spannung noch nicht groß genug, um Events die nur wenige Photoelektronen auslösen genügend zu verstärken und diese so über die 30 mV Schwelle zu bringen. Die Ansprechwahrscheinlichkeiten weiterer Photomultiplier für verschiedene Hochspannungen können der Tabelle A.1 bis Tabelle A.4 entnommen werden.

Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit aus der Signalsumme

Da durch den Čerenkov-Effekt nur eine geringe Anzahl von Photonen erzeugt wird kann es passieren, dass das vom Photomultiplier ausgehende Signal nicht über die mit 30 mV gewählte Schwelle gelangt und so das Ereignis nicht als Nachweis der Čerenkov-Strahlung gewertet wird. Die Summe der mit dem SADC aufgenommenen Photomultipliersignale kann jedoch groß genug sein um über die Schwelle zu gelangen und so als Nachweis der Čerenkov-Strahlung gewertet zu werden.

Um dies zu untersuchen wurde zunächst jeweils für die drei Photomultiplier einer Messung der zeitliche Mittelpunkt (über alle 2500 Triggerevents) der Signale bestimmt. Dies ist von Nöten, da beispielsweise die Signale der Detektoren des Typs Burle und Philips unterschiedlich lange Laufzeiten, bedingt durch die interne Detektorelektronik, besitzen. Dies ist in Abbildung 4.13 exemplarisch für die drei Detektoren B1, P12 und P9 mit den in Position a befindlichen Triggerszintillatoren dargestellt. Anschließend wurden die Signale so verschoben, dass der zeitliche Mittelpunkt der drei Signale übereinstimmt und diese schließlich zu einem Gesamtsignal aufsummiert (siehe Abbildung 4.14). Aus der Verteilung der Amplituden der einzelnen Photomultiplier (Abbildung A.4 bis Abbildung A.6) und der Amplitudenverteilung der Signalsumme, welche in Abbildung A.7 dargestellt ist, erkennt man, dass in der Signalsumme deutlich weniger Signale mit einer Amplitude die kleiner als 30 mV ist enthalten sind.

Analog zur Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit aus den vorherigen Abschnitten wurde nun die Signalamplitude des Summensignals bestimmt und geprüft, ob diese über der Schwelle von 30 mV liegt. Liegt die Amplitude des Summensignals über der gewählten Schwelle so wird dies als Nachweis der Čerenkov-Strahlung gewertet und das Event zu N_C hinzugezählt. Die Ansprechwahrscheinlichkeit aus dem Summsignal $\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$ ergibt sich dann erneut nach Gleichung 4.1 aus dem Verhältnis von N_C und N_G , wobei hier N_G ebenfalls 2500 Events umfasst.

Die so, für die drei Photomultiplier einer Messungen aus der Signalsumme, bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie deren Unsicherheiten können ebenfalls der Tabelle A.1 bis Tabelle A.4 entnommen werden. In Tabelle 4.1 ist für jede Triggerposition eine Messung und die dazu gehörige Ansprechwahrscheinlichkeit auf die Čerenkov-Strahlung aufgeführt. Die aus der Signalsumme bestimmte Ansprechwahrscheinlichkeit liegt dabei höher als die einzelnen Ansprechwahrscheinlichkeiten. Für einen späteren Betrieb im BGO-OD Experiment ergibt sich daraus die Möglichkeit die Signale der einzelnen Photomultiplier zu summieren und die Signalsumme anstelle der Einzelsignale zu verwenden. Dies könn-

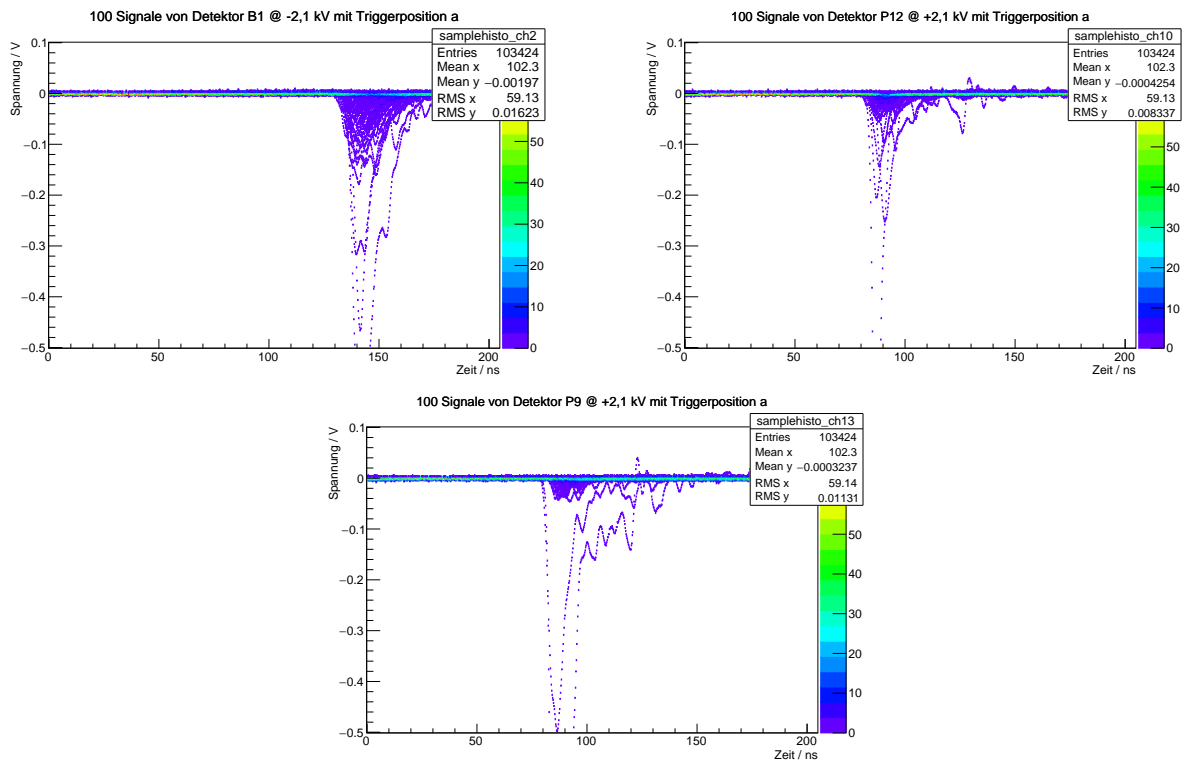


Abbildung 4.13: 100 Signale der Photomultiplier B1, P12 und P9 bei einer eingestellten Hochspannung von 2,1 kV zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Lage der zeitlichen Signalmittelpunkte. Die Triggerzintillatoren befanden sich dabei in Position *a*.

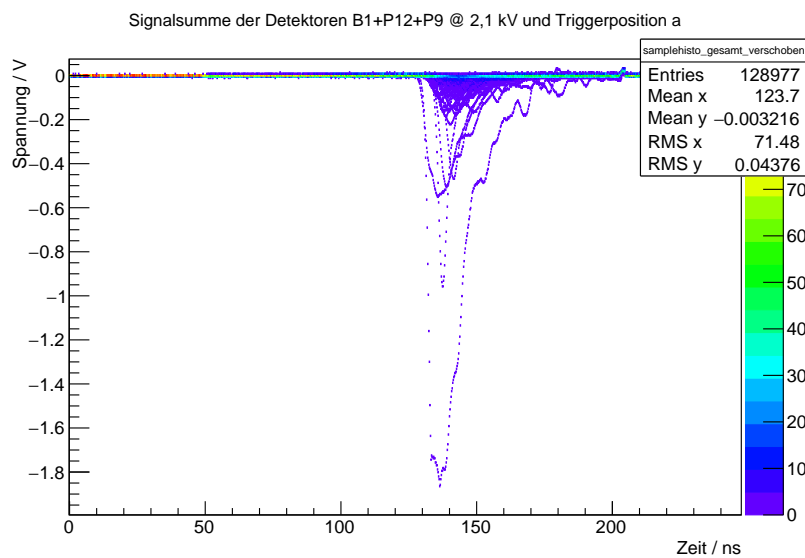


Abbildung 4.14: Signalsumme der in [Abbildung 4.13](#) dargestellten Einzelsignale der Photomultiplier B1, P12 und P9.

te, sowohl hardwareseitig über eine Summiererschaltung, als auch wie im Rahmen dieser Bachelorarbeit softwareseitig realisiert werden.

Triggerposition	Photomultiplier	HV / kV	ϵ_{\min}	$\Delta\epsilon_{\min}$	$\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$	$\Delta\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$
a	B3	2,10	0,057	0,005	0,315	0,013
	P6	2,10	0,077	0,006		
	P9	2,10	0,164	0,009		
b	B4	2,10	0,089	0,007	0,309	0,013
	P12	2,10	0,047	0,005		
	P9	2,10	0,128	0,008		
c	B11	2,10	0,092	0,007	0,563	0,019
	P12	2,10	0,033	0,004		
	P7	2,10	0,458	0,017		
d	B1	2,10	0,152	0,009	0,229	0,011
	P5	2,10	0,030	0,004		
	P12	2,10	0,052	0,005		

Tabelle 4.1: Ausgewählte Messungen für die vier Triggerpositionen und die dazugehörigen Ansprechwahrscheinlichkeiten der einzelnen Photomultiplier, sowie die aus der Signalsumme bestimmte Ansprechwahrscheinlichkeit. Des Weiteren sind die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung bestimmten Unsicherheiten der Ansprechwahrscheinlichkeiten angegeben.

Amplitudenkorrelation

Neben der oben durchgeführten Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit lässt sich desweiteren aus den SADC-Messungen bestimmen, ob zwischen den Signalen zweier Photomultiplier einer Messung eine Korrelation der Amplituden vorliegt.

Um dies zu untersuchen wurden zwei Photomultiplier einer Messung mit einer vergleichsweise hohen Ansprechwahrscheinlichkeit ausgewählt und die Signalamplituden dieser gegeneinander aufgetragen. In [Abbildung 4.15](#) und [Abbildung 4.16](#) ist dies für die Photomultiplierpaare P5/P12 (Triggerposition *c*) und B2/B10 (Triggerposition *d*) grafisch dargestellt. Sowohl für das Paar P5/P12, als auch für B2/B10 zeigt [Abbildung 4.15](#) beziehungsweise [Abbildung 4.16](#) eindeutig, dass zwischen den Amplituden keine Korrelation vorliegt. Der Grund dafür liegt im Design des Aerogel-Čerenkov-Detektors. Dieser ist, wie bereits in [Abschnitt 4.1](#) erläutert, im Inneren mit einer diffus reflektierenden Farbe bestrichen. Durch die diffuse Reflexion der Čerenkov-Strahlung im Inneren des Detektors kann es passieren, dass auf die Photokathode eines Photomultipliers nur einzelne bis gar keine Photonen eintreffen, woraus eine kleinere Signalamplitude resultiert, als bei einem Photomultiplier dessen Photokathode innerhalb des selben Events durch die diffuse Reflexion von mehreren Photonen getroffen wird. Dies verhindert eine Korrelation der Amplitudenwerte zweier Photomultiplier.

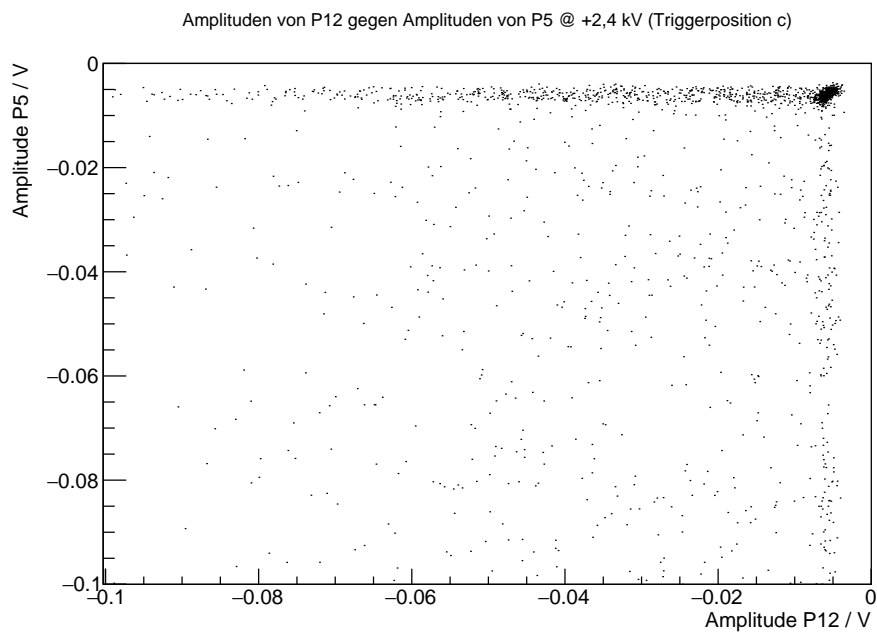


Abbildung 4.15: Amplituden der Signale aus P5 aufgetragen gegen die Amplituden aus P12 mit Triggerposition *c*

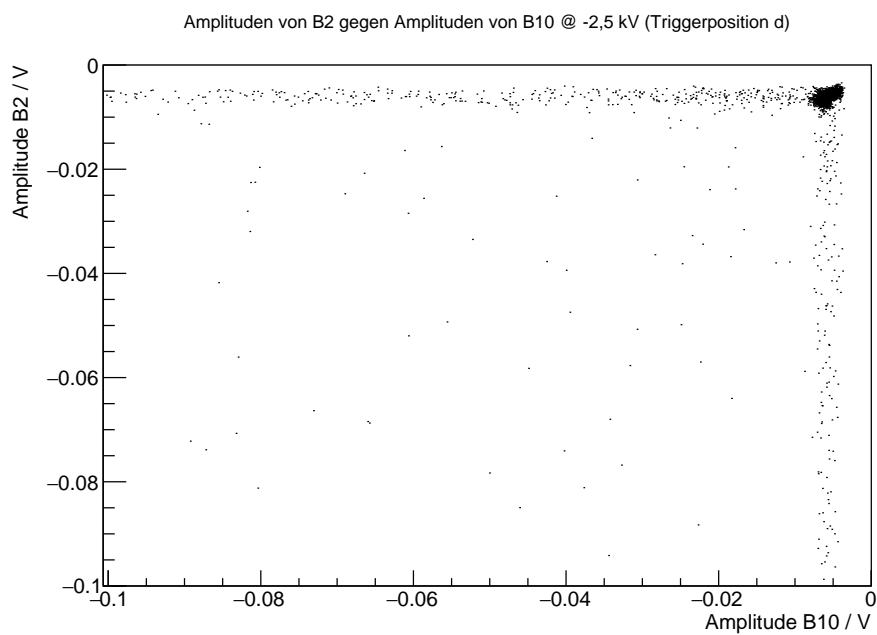


Abbildung 4.16: Amplituden der Signale aus B2 aufgetragen gegen die Amplituden aus B10 mit Triggerposition *d*.

4.4 Testmessung während der Strahlzeit November/Dezember 2018

Für das BGO-Experiment stand im November beziehungsweise Dezember 2018 eine zweiwöchige Strahlzeit an, welche eine Gelegenheit bot im Rahmen dieser Bachelorarbeit den Aerogel-Čerenkov-Detektor in das Experiment einzubauen und Testmessungen unter realen Bedingungen durchzuführen.

4.4.1 Vorbereitung und Aufbau für die Testmessungen

Als Standort des Detektors für die Testmessungen wurde der Bereich zwischen den Driftkammern und den ToF-Wänden im Vorwärtsspektrometer gewählt, da hier ohne weitere Vorbereitung ausreichend Platz zum Aufbau des Detektors zur Verfügung stand. Im Vorfeld der Strahlzeit wurde dort zunächst ein Gerüst aus Aluminiumprofilen aufgebaut. Auf dieses Gerüst wurde der Detektor für die Testmessungen aufgesetzt, wobei die Position und Höhe des Gerüsts so gewählt wurde, dass der Detektor sich auf Strahlhöhe befindet und so genügend Teilchen den Detektor passieren konnten. In [Abbildung A.8](#) ist der Gerüstaufbau schematisch skizziert, während [Abbildung 4.17](#) zur Veranschaulichung eine Seitenansicht des Vorwärtsspektrometers mit eingezeichneter Gerüst- beziehungsweise Detektorposition zeigt.

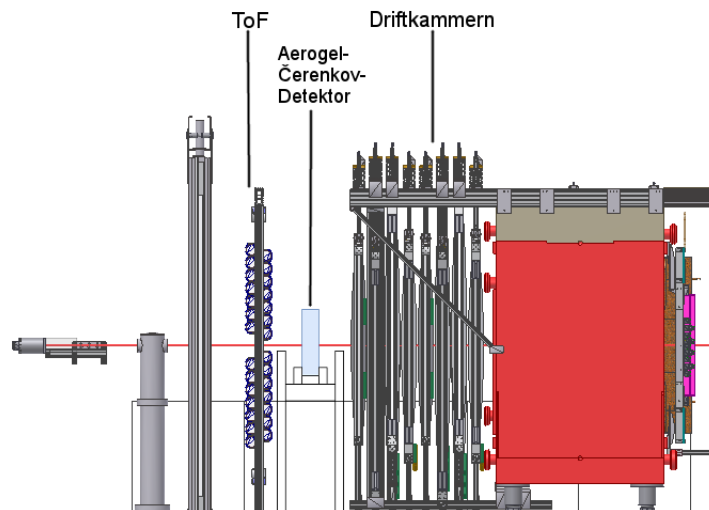


Abbildung 4.17: Seitenansicht des Vorwärtsspektrometers mit eingezeichnetem Detektorgerüst. Die Position des Aerogel-Čerenkov-Detektor ist hier hellblau hervorgehoben. (aus [11]).

Im Zuge der Strahlzeit wurde der Detektor für zwei Testmessungen in die für ihn vorgesehene Halterung eingesetzt, wobei darauf geachtet wurde, dass der Detektor mittig zu den Driftkammern stand. Im Gegensatz zu den im Labor durchgeführten Testmessungen bestand hier die Möglichkeit die Messung unter der Verwendung aller zwölf Photomultiplier durchzuführen. Analog zu den im Labor durchgeführten Testmessung erfolgte die Auslese der Photomultiplier mittels SADC⁵, welcher mit dem DAQ⁶-System des BGO-OD Experimentes verbunden war. Als Triggersignal für den SADC fungierte der allgemeine Trigger des BGO-OD Experimentes.

Die Hochspannung der Photomultiplier wurde für die Testmessungen am Experiment, ausgehend von den Ergebnissen der Labormessung aus [Abschnitt 4.3.2](#), für alle der zwölf Photomultiplier zu $\pm 2,6$ kV

⁵ Verwendet wurde der SADC V1742 der Firma CAEN, mit 1024 Samplings pro Event bei einer eingestellten Samplingrate von 1 GS/s.

⁶ Data AcQuisition

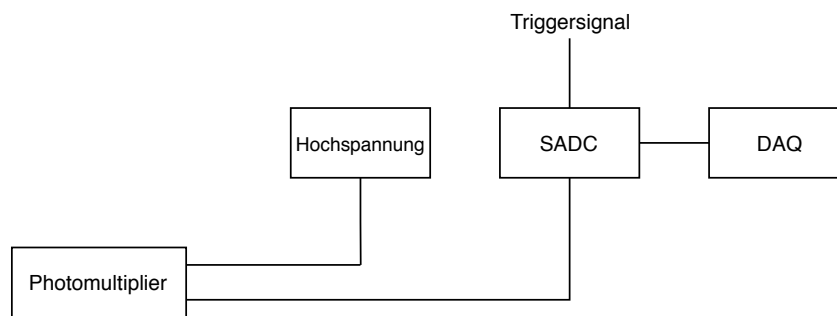


Abbildung 4.18: Schematische Darstellung der Messelektronik für einen der zwölf Photomultiplier.

gewählt. In [Abbildung 4.18](#) ist schematisch der Anschluss eines Photomultipliers an die Hochspannung, sowie an den SADC skizziert. Der Anschluss der restlichen Photomultiplier an die Messelektronik erfolgte vollkommen analog.

Erste Testmessung

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt wurden zwei Testmessungen, die jeweils mehrere Runs umfassen, während der Strahlzeit durchgeführt. Die erste Testmessung fand zu Beginn der Strahlzeit am 29.11.2018 statt und umfasst dabei die Runs 45 971 bis 46 012. Da die Testmessung am Anfang der Strahlzeit durchgeführt wurde war das Target des BGO-OD Experimentes noch nicht vollständig mit flüssigem Wasserstoff gefüllt und der Dipolmagnet des Vorwärtsspektrometers ausgeschaltet. Des Weiteren konnte kurz nach dem Einbau des Detektors in das Experiment, im Kontrollraum des BGO-OD Experimentes, beobachtet werden, dass in unteren Hälfte der ToF-Wand ungewöhnlich viele Ereignisse auftraten. Daraus konnte geschlossen werden, dass der Aufsetzpunkt des Detektors in seinem Gerüst zu hoch gewählt worden war, sodass sich Photomultiplier P8 direkt im Strahl befand. Zur Veranschaulichung ist dazu in [Abbildung A.9](#) der Signalverlauf aus P8 für einen Run aus der ersten Testmessung und in [Abbildung A.10](#) für einen Run der zweiten Testmessung dargestellt. Erkennbar ist, dass für die Messung in der sich der Photomultiplier im Strahl befand deutlich höhere Amplituden der Signale gemessen werden konnten, was dafür spricht das der Photomultiplier unmittelbar getroffen wurde.

Zweite Testmessung

Die zweite Testmessung fand in der Mitte der Strahlzeit am 10.12.2018 statt und umfasst die Runs 47 736 bis 47 755. Während dieser Testmessung befand sich das Target im vollständig gefüllten Zustand und der Dipolmagnet des Vorwärtsspektrometers war eingeschaltet ($B = 0,216 \text{ T}$). Zu dem wurde im Vorfeld der zweiten Testmessung die Höhe des Aufsetzpunktes des Aerogel-Čerenkov-Detektors im Gerüst herab gesetzt, sodass die Mitte des Detektors nun mit der Mitte der Driftkammern und somit der Strahlhöhe übereinstimmte.

4.4.2 Auswertung

Im folgenden wird beispielhaft am Run 47 754 der zweiten Testmessung eine erste Auswertung der Daten mittels Explora⁷ vorgenommen. Eine vollständige Analyse, ob und in welchem Umfang der

⁷ Explora ist ein auf ROOT basierendes Softwareframework zur Analyse.

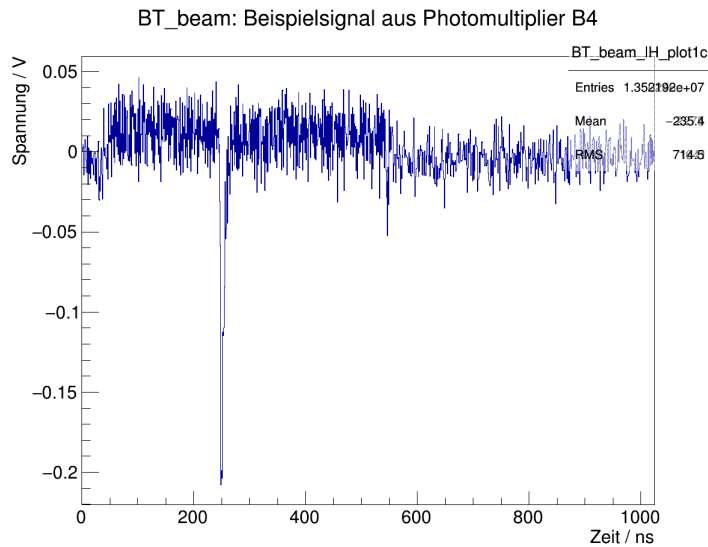


Abbildung 4.19: Signalverlauf aus Photomultiplier B4 für einen Run der zweiten Testmessung am BGO-OD Experiment.

Aerogel-Čerenkov-Detektor eine verbesserte Teilchenidentifikation am BGO-OD Experiment ermöglicht ist Bestandteil einer weiteren in Vorbereitung befindlichen Bachelorarbeit.

Signalverlauf

In [Abbildung 4.19](#) beziehungsweise [Abbildung 4.20](#) ist beispielhaft der mit dem SADC gemessene Signalverlauf aus einem Photomultiplier der Firma Burle und Philips dargestellt. Beim betrachten der Beispielsignale fällt auf, dass die Grundlinie dieser einen periodisch schwankenden Offset von etwa 0,02 V besitzt. Die Periode der Schwankung lässt sich anhand der Abbildungen mit etwa 1 000 ns abschätzen. Da die Schwankung, sowohl im Signalverlauf der Burle- als auch Philips-Photomultiplier beobachtbar ist und in den Labormessung dieses Verhalten nicht beobachtet werden konnte ist davon auszugehen, dass diese dem für die Testmessungen am BGO-OD Experiment verwendeten SADC zugrunde liegt. Eine genaue Analyse der Daten sollte diese Schwankung der Grundlinie eventuell berücksichtigen.

Neben der Schwankungen in der Signalgrundlinie zeigen die während der Testmessung aufgenommenen Daten noch eine weitere Auffälligkeit. Betrachtet man die X-Projektion eines Histogramms, welches alle Signale eines Photomultipliers für einen Run beinhaltet erkennt man, dass in dem Zeitfenster in dem die Signale gemessen wird etwa alle 30 bis 40 ns eine Häufung der Signale auftritt ([Abbildung 4.22](#)). Da dies ebenfalls nicht während den Testmessungen im Labor beobachtet werden konnte lässt sich daraus schließen, dass die Ursache dafür nicht am Čerenkov-Detektor selbst liegt. Zunächst wurde vermutet, dass die Extraktion der Elektronen aus ELSA, welche in bunches⁸ geschieht, diese periodische Häufung verursacht. Da jedoch die bunches mit einer Periodizität von 2 ns und einer maximalen Länge von circa 120 ps extrahiert werden ist dies nicht der Fall und der Ursprung hierfür bleibt unbekannt [2].

⁸ engl. für Bündel

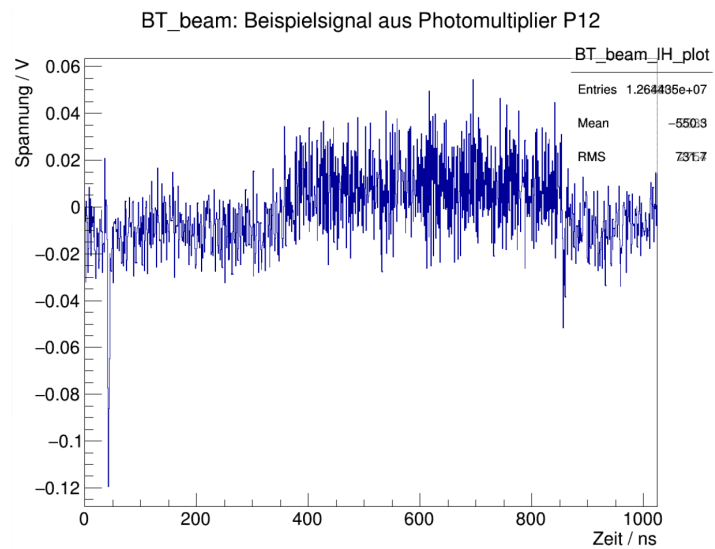


Abbildung 4.20: Signalverlauf aus Photomultiplier P12 für einen Run der zweiten Testmessung am BGO-OD Experiment.

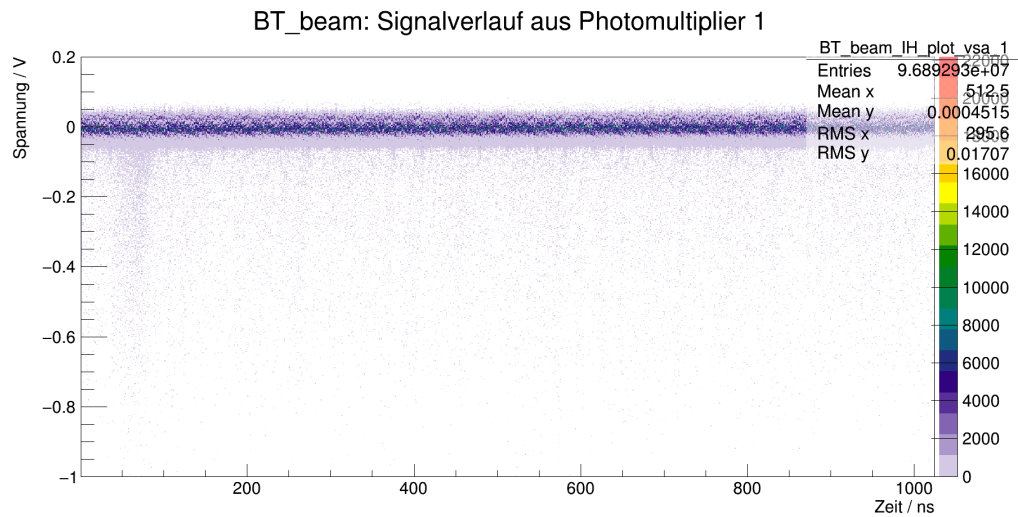


Abbildung 4.21: Histogram mit allen Signalen des Photomultipliers B1 aus Run 47754.

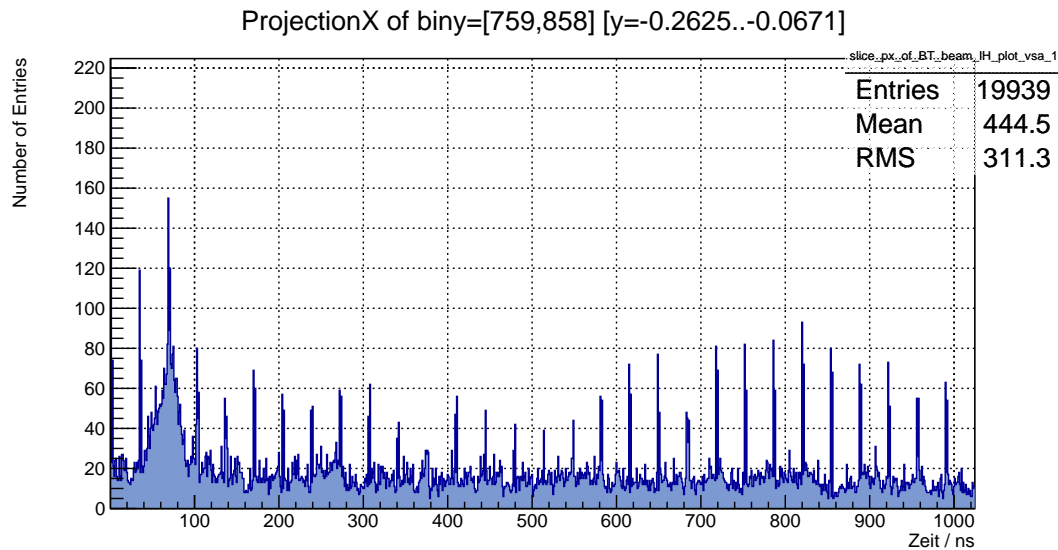


Abbildung 4.22: Dargestellt ist die X-Projektion von [Abbildung 4.21](#). Erkennbar ist das periodisch etwa alle 30 bis 40 ns eine Häufung von Signalen auftritt.

Multiplizität

Analog zur Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit für die Labormessung lässt sich aus den Messungen der Strahlzeit die sogenannte Multiplizität ermitteln. Diese gibt an, wie viele der zwölf Photomultiplier bei einem Triggerevent auf dieses ansprechen.

Zur Bestimmung der Multiplizität wurden an die Signale der Photomultiplier zwei Bedingungen gestellt. Zum einen muss die Amplitude des Signals über der Schwelle von 30 mV liegen und zum anderen muss das Signal zeitlich mit den anderen korreliert sein. Aus der X-Projektion aller Signale für einen Photomultiplier der Firma Philips und Burle wurde so als Zeitschnitt 140 ns abgeschätzt (vergleiche [Abbildung 4.22](#)). Liegt also die Signalamplitude eines Events über der Schwelle von 30 mV und das Signal ereignete sich in den ersten 140 ns des gemessenen Zeitraums so gilt dies als Nachweis des Events durch den Photomultiplier und die Multiplizität wird um eins erhöht. Eine Multiplizität von zwölf entspricht dabei dem Nachweis des Events durch alle der zwölf Photomultiplier. Die Multiplizität des Aerogel-Čerenkov-Detektors ist beispielhaft für den Run 47754 in [Abbildung 4.23](#) dargestellt. Aus [Abbildung 4.23](#) ist ersichtlich, dass falls der Detektor das Event nachweisen konnte im Mittel zwei der zwölf Photomultiplier auf dieses ansprechen.

Eine tiefer gehende Analyse die beispielsweise genauere Zeitschnitte, als den in dieser Arbeit durchgeführten einfach Schnitt bei 140 ns und eine Berücksichtigung der Schwankungen in der Grundlinie beinhaltet wird zeigen, ob und in welchem Umfang der Aerogel-Čerenkov-Detektor eine bessere Teilchenidentifikation für das BGO-OD Experiment ermöglicht.

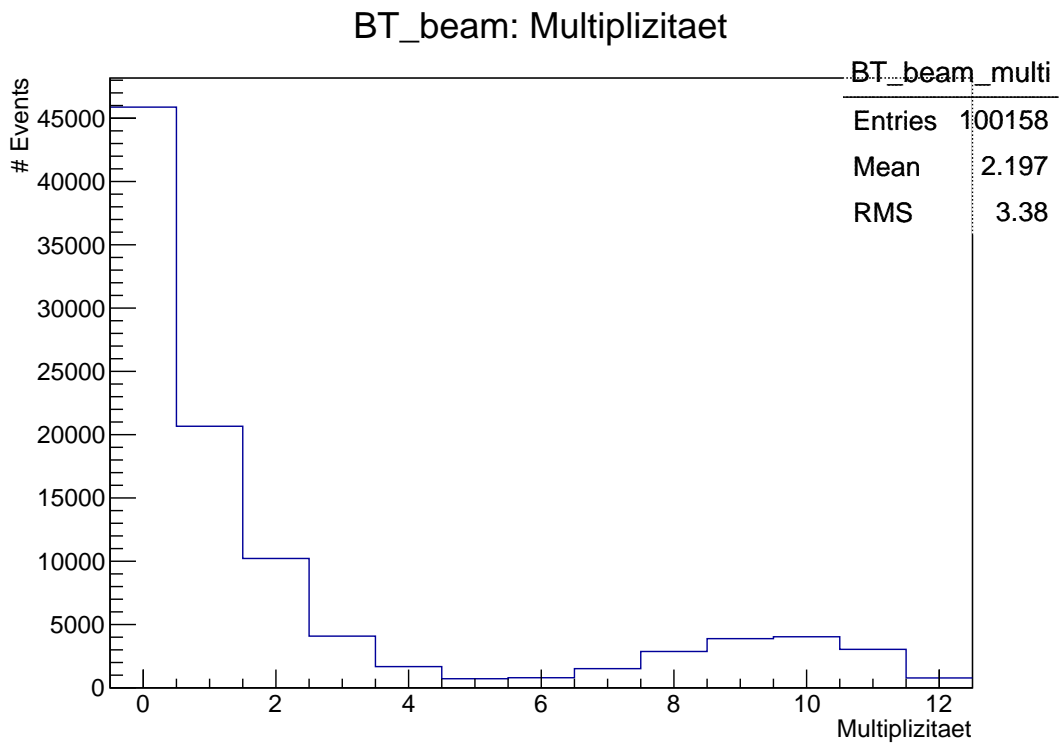


Abbildung 4.23: Multiplizität des Aerogel-Čerenkov-Detektors für den Run 47754.

Fazit und Ausblick

Ziel dieser Bachelorarbeit war es einen Aerogel-Čerenkov-Detektor für das BGO-OD Experiment in Betrieb zu nehmen. Dieser soll zukünftig, unter Ausnutzung des Čerenkov-Effektes, eine bessere Identifikation geladener Teilchen am Experiment ermöglichen.

Dazu wurden zunächst Funktionstests an den Photomultipliern des Detektors und anschließende Messungen der Ansprechwahrscheinlichkeit dieser auf die Čerenkov-Strahlung mittels kosmischer Höhenstrahlung im Labor durchgeführt. Aus den Funktionstests ergab sich, dass trotz längerer Lagerungszeit die Photomultiplier des Detektors einsatzbereit sind und somit der Detektor grundsätzlich funktionsfähig ist. Bei den nachfolgenden Testmessungen konnte das Ansprechverhalten des Detektors auf die Čerenkov-Strahlung mittels Höhenstrahlung charakterisiert werden. Photomultiplier, welche sich näher am Entstehungsort der Čerenkov-Strahlung befinden, besitzen im Vergleich zu denen die eine größere Distanz zum Entstehungsort aufweisen eine höhere Ansprechwahrscheinlichkeit. Da jedoch auch weiter entfernte Photomultiplier eine von Null verschiedene Ansprechwahrscheinlichkeit besitzen zeigt sich, dass die Idee die wenigen Čerenkov-Photonen mittels diffuser Reflexion im Detektorvolumen zu verteilen gut funktioniert. Des Weiteren konnte während den Testmessungen im Labor festgestellt werden, dass Photomultiplier P8 ein, im Vergleich zu den anderen Photomultipliern der Firma Philips, stark abweichendes Verstärkungsverhalten besitzt. Dies äußert sich darin, dass dieser bereits bei vergleichsweise niedrigen Hochspannungen eine große Verstärkung aufweist. Für den zukünftigen Betrieb des Aerogel-Čerenkov-Detektors am BGO-OD Experiment sollte die optimale Betriebsspannung des Photomultipliers bestimmt werden. Dazu könnte man beispielsweise in einer Dunkelkammer eine Leuchtdiode vor dem Photomultiplier platzieren und anschließend für verschiedene, in kleinen Schritten gewählte, Hochspannungen ein Pulshöhenspektrum mittels ADC aufnehmen. Aus diesen Spektren ließe sich dann das optimale Signal-Rausch-Verhältnis und somit die optimale Betriebsspannung des Photomultipliers ermitteln.

Neben den im Labor durchgeführten Testmessungen konnte im Rahmen dieser Bachelorarbeit der Aerogel-Čerenkov-Detektor erstmals in das BGO-OD Experiment eingebaut und Testmessungen unter den realen Bedingungen einer Strahlzeit durchgeführt werden. Eine anschließende Erstausswertung der Daten zeigte, dass im Mittel zwei der zwölf Photomultiplier auf ein Triggerevent ansprachen. Des Weiteren konnten Auffälligkeiten in den gemessenen Signalen der Photomultiplier, die in der Testmessung im Labor nicht auftraten, beobachtet werden. Eine genauere Analyse der Daten sollte zumindest den Einfluss dieser auf das Ergebnis untersuchen. Eine weitere sich in Vorbereitung befindliche Bachelorarbeit wird zeigen, ob und in welchem Ausmaße der Aerogel-Čerenkov-Detektor eine verbesserte Teilchenidentifikation für das BGO-OD Experiment ermöglicht.

Literatur

- [1] *Experimenteller Aufbau des BGO-Experiments: BGO-Ball*, (), eingesehen am 18.12.2018, URL: <https://bgo-od.physik.uni-bonn.de/> (siehe S. 3).
- [2] A. Bella, *Linearly polarised photon beam at the BGO-OD experiment at ELSA*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2016 (siehe S. 4, 25).
- [3] T. Zimmermann, *Møller polarimetry for the BGO-OD experiment and cross section measurement of the reaction $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$ at the extreme forward angles*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2016 (siehe S. 4).
- [4] *Experimenteller Aufbau des BGO-Experiments: BGO-Ball*, (), eingesehen am 18.12.2018, URL: <https://bgo-od.physik.uni-bonn.de/ExperimentalSetup/BgoBall/> (siehe S. 4).
- [5] H. Kolanoski und N. Wermes, *Teilchendetektoren - Grundlagen und Anwendungen*, 1. Aufl. 2016, Springer-Verlag, 2016, ISBN: 978-3-662-45350-6 (siehe S. 5–9).
- [6] *Informationen über das PANDA-Experiment*, (), eingesehen am 22.01.2019, URL: <https://www.gsi.de/work/forschung/pandahadronen/experimente/panda.htm> (siehe S. 8).
- [7] *Informationen über DIRC-Detektoren am PANDA-Experiment*, (), eingesehen am 14.01.2019, URL: <https://www.ep1.ruhr-uni-bochum.de/PandaBMBF/index.php/pandadetektor/teilchenidentifikation/tsdirc> (siehe S. 8).
- [8] *Datenblatt des Photomultipliers XP 2041 der Firma Philips*, (), nur in Kopie vorhanden (siehe S. 11).
- [9] *Datenblatt des Photomultipliers 8854 der Firma Burle*, (), eingesehen am 16.01.2019, URL: https://hallcweb.jlab.org/DocDB/0009/000965/001/Burle_8854_PMT_specs.pdf (siehe S. 11).
- [10] S. Materne, *Ein Aerogel-Cherenkov-Detektor für das CBELSA/TAPS Experiment*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2007 (siehe S. 12).
- [11] *Seitenansicht des Vorwärtsspektrometers (Gruppeninterne Website)*, (), URL: 24.01.2019 (siehe S. 23).

Anhang

A.1 Testmessung mit Höhenstrahlung

A.1.1 Aufbau

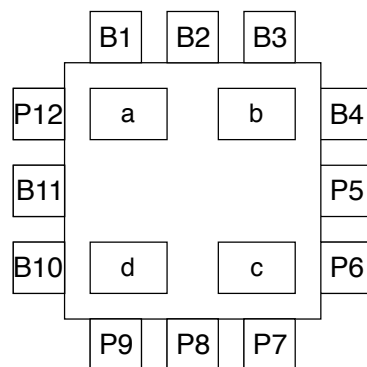


Abbildung A.1: Frontansicht des Detektors mit den durch *a, b, c* und *d* gekennzeichneten Positionen der Triggerszintillatoren.

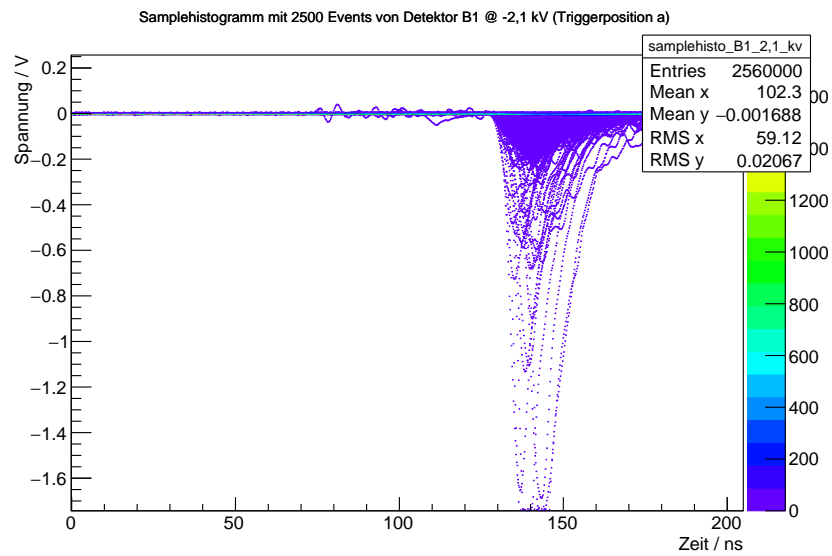


Abbildung A.2: Histogramm der SADC-Messung mit 2500 Evens für Photomultiplier B1.

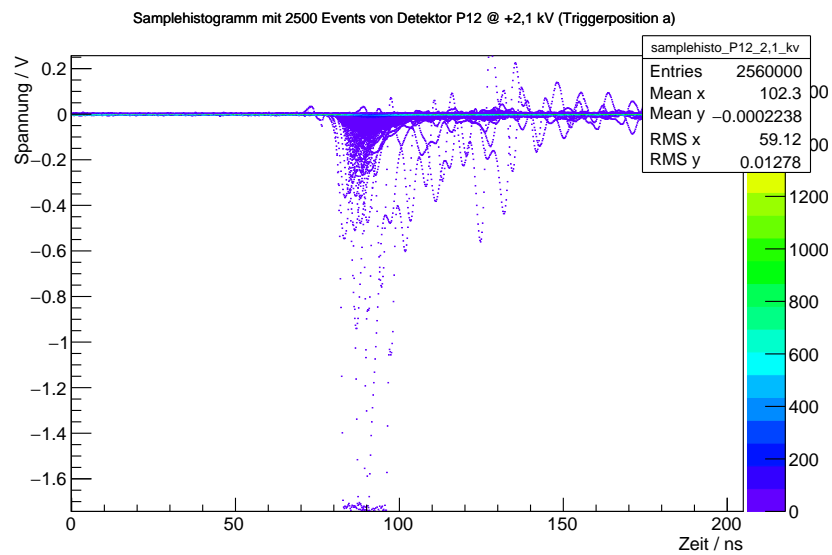


Abbildung A.3: Histogramm der SADC-Messung mit 2500 Evens für Photomultiplier P12.

A.1.2 Auswertung

Ansprechwahrscheinlichkeiten der Photomultiplier

Messung	Photomultiplier	HV / kV	ϵ_{\min}	$\Delta\epsilon_{\min}$	$\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$	$\Delta\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$
1	B1	2,10	0,440	0,016	0,602	0,020
	P12	2,10	0,212	0,011		
	P9	2,10	0,122	0,008		
2	B2	2,10	0,018	0,003	0,367	0,015
	P5	2,10	0,025	0,004		
	P9	2,30	0,330	0,014		
3	B3	2,10	0,057	0,005	0,315	0,013
	P6	2,10	0,077	0,006		
	P9	2,10	0,164	0,009		
4	B10	2,10	0,008	0,002	0,138	0,008
	P7	2,10	0,107	0,007		
	P9	1,95	0,019	0,003		
5	B11	2,10	0,157	0,009	0,559	0,019
	P8	2,10	0,475	0,018		
	P9	1,85	0,009	0,002		
6	B4	2,10	0,025	0,004	0,659	0,021
	P12	2,30	0,564	0,019		
	P9	2,10	0,154	0,009		

Tabelle A.1: Messungen die mit Triggerposition a durchgeführt wurden und die jeweils nach [Gleichung 4.1](#) bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechneten Unsicherheiten bei einer Schwelle von 30 mV.

Messung	Photomultiplier	HV / kV	ϵ_{\min}	$\Delta\epsilon_{\min}$	$\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$	$\Delta\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$
1	B4	2,10	0,089	0,007	0,309	0,013
	P12	2,10	0,047	0,005		
	P9	2,10	0,128	0,008		
2	B3	2,10	0,234	0,011	0,643	0,021
	P7	2,10	0,131	0,008		
	P8	2,10	0,472	0,017		
3	B2	2,10	0,027	0,004	0,240	0,011
	P6	2,10	0,096	0,007		
	P5	2,10	0,065	0,006		
4	B1	2,10	0,165	0,009	0,998	0,029
	P12	2,30	0,319	0,014		
	P8	2,30	0,998	0,029		
5	B10	2,10	0,005	0,002	0,212	0,011
	P12	2,10	0,066	0,006		
	P7	2,10	0,134	0,008		
6	B11	2,10	0,164	0,009	0,204	0,010
	P12	1,95	0,007	0,002		
	P7	1,95	0,015	0,003		
7	B11	2,25	0,29	0,013	0,640	0,021
	P12	2,30	0,311	0,013		
	P7	2,30	0,326	0,014		

Tabelle A.2: Messungen die mit Triggerposition b durchgeführt wurden und die jeweils nach [Gleichung 4.1](#) bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechneten Unsicherheiten bei einer Schwelle von 30 mV.

Messung	Photomultiplier	HV / kV	ϵ_{\min}	$\Delta\epsilon_{\min}$	$\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$	$\Delta\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$
1	B11	2,10	0,092	0,007	0,563	0,019
	P12	2,10	0,033	0,004		
	P7	2,10	0,458	0,017		
2	B10	2,10	0,011	0,003	0,557	0,019
	P9	2,10	0,172	0,010		
	P6	2,10	0,429	0,016		
3	B11	2,10	0,072	0,006	0,719	0,023
	P8	2,10	0,666	0,022		
	P5	2,10	0,061	0,006		
4	B2	2,10	0,009	0,002	0,492	0,018
	P7	2,10	0,472	0,017		
	B4	2,10	–	–		
5	B1	2,10	0,151	0,009	0,916	0,027
	P7	2,40	0,783	0,024		
	P6	2,40	0,824	0,025		
6	B3	2,10	0,084	0,007	0,650	0,021
	P12	2,40	0,304	0,013		
	P5	2,40	0,474	0,017		
7	B4	2,10	0,016	0,003	0,656	0,021
	P8	1,85	0,402	0,015		
	P9	2,40	0,451	0,017		
8	B10	2,40	0,107	0,007	0,872	0,026
	P6	2,40	0,809	0,025		
	P5	2,40	0,476	0,017		
9	B3	2,40	0,260	0,012	0,847	0,026
	P7	2,30	0,738	0,023		
	P9	2,40	0,435	0,016		

Tabelle A.3: Messungen die mit Triggerposition c durchgeführt wurden und die jeweils nach Gleichung 4.1 bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechneten Unsicherheiten bei einer Schwelle von 30 mV. Für die Messung mit Detektor B2 und P7 bei einer Hochspannung von 2,1 kV war der Detektor B4 versehentlich nicht korrekt mit dem SADC verbunden, daher bezieht sich die Ansprechwahrscheinlichkeit des Summensignal nur auf Detektor B2 und P7.

Messung	Photomultiplier	HV / kV	ϵ_{\min}	$\Delta\epsilon_{\min}$	$\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$	$\Delta\epsilon_{\min}^{\text{sum}}$
1	B3	2,10	0,033	0,004	0,571	0,019
	P7	2,10	0,133	0,008		
	P9	2,10	0,459	0,017		
2	B2	2,10	0,010	0,002	0,680	0,022
	P6	2,10	0,141	0,008		
	P8	2,10	0,636	0,021		
3	B1	2,10	0,152	0,009	0,229	0,011
	P5	2,10	0,030	0,004		
	P12	2,10	0,052	0,005		
4	B4	2,10	0,015	0,003	0,592	0,020
	P5	2,50	0,384	0,015		
	P12	2,50	0,360	0,014		
5	B10	2,10	0,029	0,004	0,298	0,013
	P5	2,20	0,116	0,008		
	P12	2,20	0,140	0,008		
6	B11	2,10	0,256	0,012	0,551	0,019
	P5	2,30	0,236	0,011		
	P12	2,30	0,228	0,011		
7	B11	2,50	0,408	0,016	0,581	0,020
	P5	2,30	0,219	0,011		
	B1	2,30	0,172	0,009		
8	B10	2,50	0,263	0,012	0,476	0,017
	P5	2,30	0,227	0,011		
	B2	2,50	0,135	0,008		
9	B3	2,50	0,200	0,010	0,516	0,018
	P5	2,30	0,224	0,011		
	B4	2,50	0,277	0,012		
10	B1	2,50	0,214	0,011	0,571	0,019
	P12	2,40	0,334	0,014		
	B4	2,40	0,246	0,012		

Tabelle A.4: Messungen die mit Triggerposition d durchgeführt wurden und die jeweils nach [Gleichung 4.1](#) bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechneten Unsicherheiten bei einer Schwelle von 30 mV.

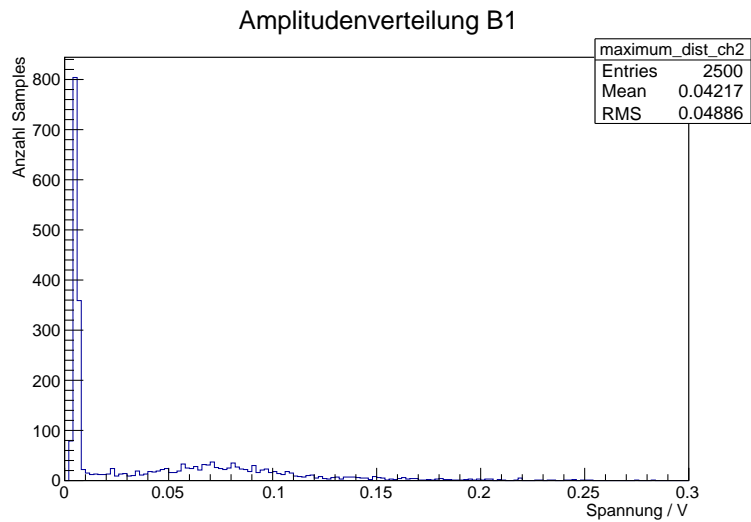


Abbildung A.4: Amplitudenverteilung der Signale aus Photomultiplier B1 bei $-2,1$ kV (Triggerposition *a*).

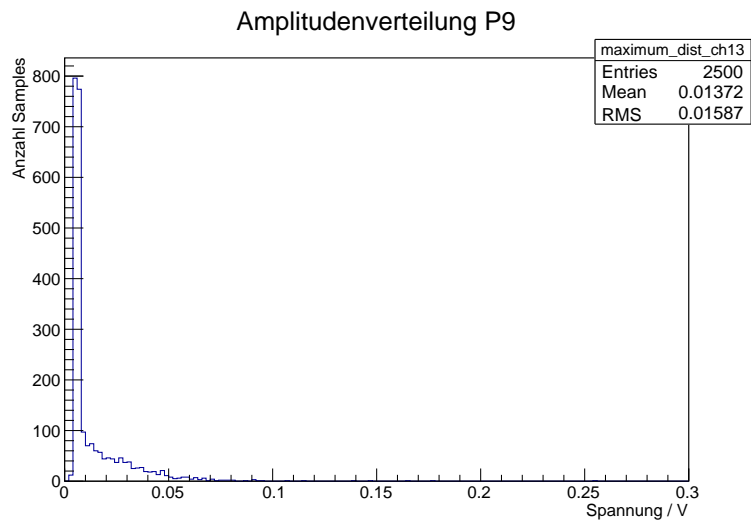


Abbildung A.5: Amplitudenverteilung der Signale aus Photomultiplier P9 bei $2,1$ kV (Triggerposition *a*).

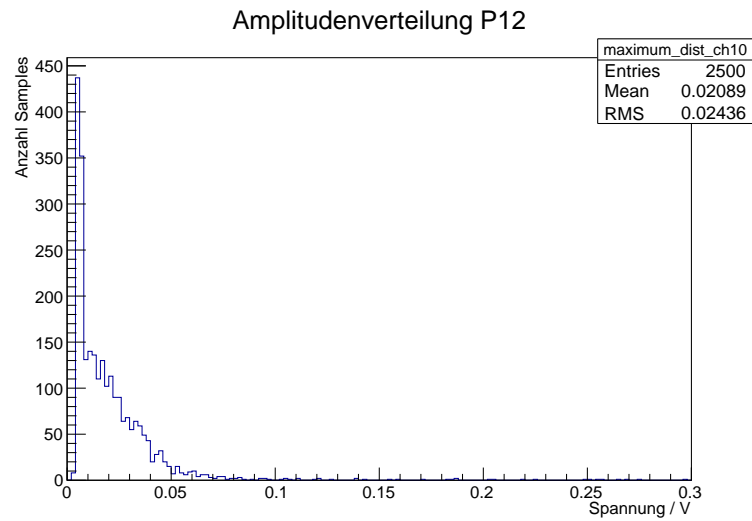


Abbildung A.6: Amplitudenverteilung der Signale aus Photomultiplier P9 bei 2,1 kV (Triggerposition *a*).

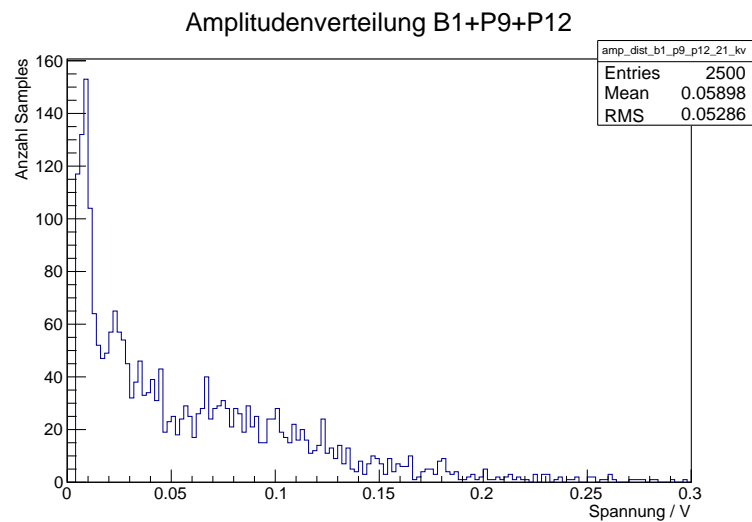


Abbildung A.7: Amplitudenverteilung der Signalsumme von Photomultiplier B1, P12 und P9 bei $\pm 2,1$ kV (Triggerposition *a*).

A.2 Testmessung während der Strahlzeit November/Dezember 2018

A.2.1 Aufbau

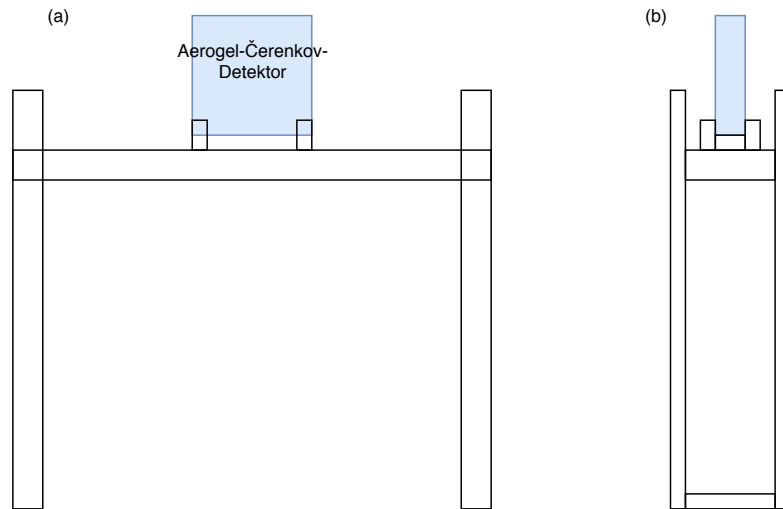


Abbildung A.8: (a) Frontansicht des Detektorgerüsts. (b) Seitenansicht des Gerüsts. In hellblau ist die Position des Aerogel-Čerenkov-Detektor angedeutet.

Erste Testmessung

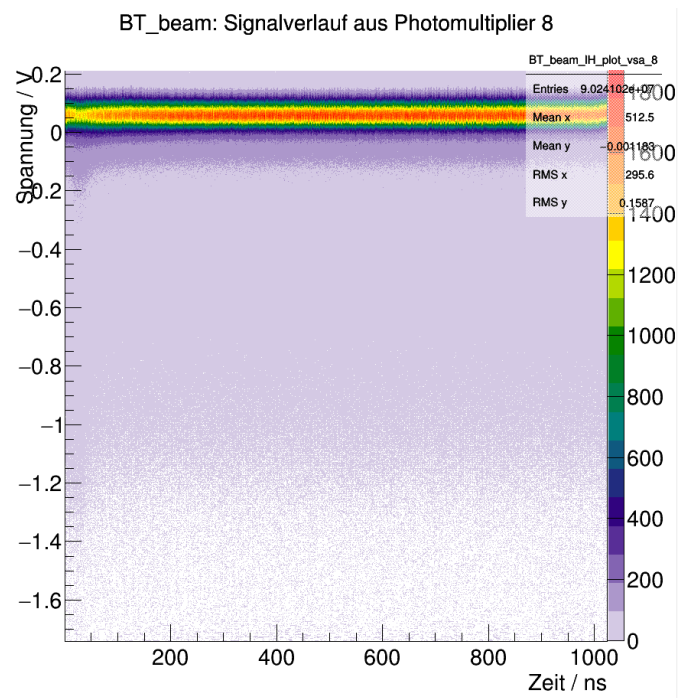


Abbildung A.9: Signalverlauf aus Photomultiplier P8 aus der ersten Testmessung (Run 46011).

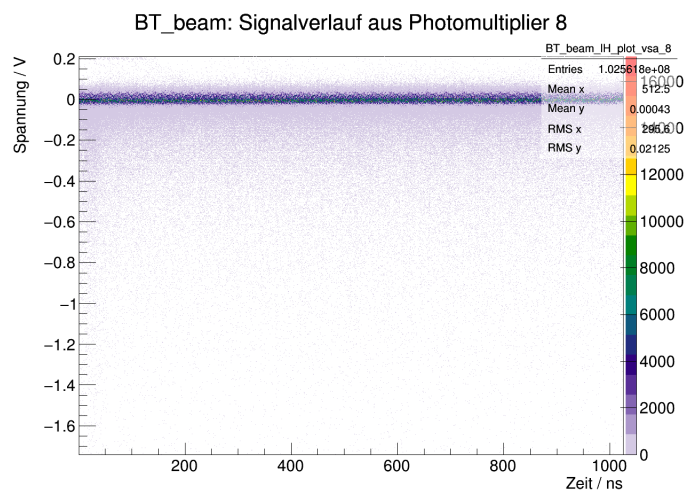


Abbildung A.10: Signalverlauf aus Photomultiplier P8 aus der zweiten Testmessung (Run 47754).

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Übersicht über das BGO-OD Experiment (aus [1]).	3
3.1	Veranschaulichung des Durchgangs eines geladenen Teilchens durch ein dielektrisches Medium. (a) Die Geschwindigkeit des Teilchens v ist kleiner als c_n und eine symmetrische Polarisation ist erkennbar. (b) Die Geschwindigkeit ist größer als c_n und die daraus resultierende Polarisation ist asymmetrisch (aus [5]).	5
3.2	Darstellung der Ausbildung der Čerenkov-Strahlung unter dem Winkel θ_c (entnommen aus [5]).	6
3.3	Schematisch Darstellung des Funktionsprinzipes eines Ring-Čerenkov-Detektors (entnommen aus [5]).	8
3.4	Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Photomultipliers (aus [5]). . . .	9
4.1	(a) Schematische Frontansicht des Detektors. (b) Schematische Seitenansicht des Detektors. Die Bezeichnung B steht dabei für Photomultiplier der Firma Burle respektive P für die der Firma Philips. Die im weiteren Verlauf verwendeten Bezeichnungen entsprechen der Anordnung aus (a).	12
4.2	Schematische Darstellung der Aerogelwand (entnommen aus [10]).	12
4.3	Oszillogramm des Photomultipliersignals des Photomultipliers P12 bei einer eingestellten Hochspannung von 2,1 kV mit 20 mV/div und 20 ns/div.	13
4.4	Oszillogramm des Photomultipliersignals des Photomultipliers B4 bei einer eingestellten Hochspannung von -2,1 kV mit 20 mV/div und 20 ns/div.	13
4.5	Signalverhalten des Photomultipliers P8 bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Besonders auffällig ist der Signalanteil oberhalb der Nulllinie, dessen Ursprung in einem Masseproblem liegen könnte.	13
4.6	Schematische Darstellung des Aufbaus zur Charakterisierung der Photomultiplier mittels kosmischer Höhenstrahlung.	14
4.7	Oszillogramm des Triggersignals (CH3) und der Signale der Photomultiplier B4 (CH1), B1 (CH4) und P12 (CH2) bei einer eingestellten Hochspannung von $\pm 2,4$ kV und Triggerszintillatorposition d . Auffällig ist hier das Signal aus Photomultiplier P12, welches mit circa 10 mV eine im Vergleich zu den Signalen der Photomultiplier B4 und B1 eine geringere Amplitude besitzt. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Photokathode von P12 in diesem Event nur von wenigen Photonen getroffen worden ist.	15
4.8	Ansprechwahrscheinlichkeit der Photomultiplier für Triggerposition a bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Die Farbe der zu den Photomultipliern korrespondierenden Felder gibt dabei die Ansprechwahrscheinlichkeit entsprechend der Farbskala auf der rechten Seite an.	17

4.9	Ansprechwahrscheinlichkeit der Photomultiplier für Triggerposition b bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Die Farbe der zu den Photomultipliern korrespondierenden Felder gibt dabei die Ansprechwahrscheinlichkeit entsprechend der Farbskala auf der rechten Seite an.	17
4.10	Ansprechwahrscheinlichkeit der Photomultiplier für Triggerposition d bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Die Farbe der zu den Photomultipliern korrespondierenden Felder gibt dabei die Ansprechwahrscheinlichkeit entsprechend der Farbskala auf der rechten Seite an.	17
4.11	Ansprechwahrscheinlichkeit der Photomultiplier für Triggerposition c bei einer Hochspannung von 2,1 kV. Die Farbe der zu den Photomultipliern korrespondierenden Felder gibt dabei die Ansprechwahrscheinlichkeit entsprechend der Farbskala auf der rechten Seite an.	17
4.12	Ansprechwahrscheinlichkeiten der Photomultiplier P12 und B4 auf die Čerenkov-Strahlung in Abhängigkeit der angelegten Hochspannung. Die Triggerszintillatoren befanden sich in Position d und als Schwelle wurde 30 mV gewählt. Die Unsicherheit der Ansprechwahrscheinlichkeit wurde nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung gemäß Gleichung 4.1 berechnet und die der Hochspannung wurde zu $\pm 0,05$ kV abgeschätzt, da die Hochspannung im Verlauf einer Messung leicht vom ursprünglich eingestellten Wert abwich.	18
4.13	100 Signale der Photomultiplier B1, P12 und P9 bei einer eingestellten Hochspannung von 2,1 kV zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Lage der zeitlichen Signalmittelpunkte. Die Triggerszintillatoren befanden sich dabei in Position a	20
4.14	Signalsumme der in Abbildung 4.13 dargestellten Einzelsignale der Photomultiplier B1, P12 und P9.	20
4.15	Amplituden der Signale aus P5 aufgetragen gegen die Amplituden aus P12 mit Triggerposition c	22
4.16	Amplituden der Signale aus B2 aufgetragen gegen die Amplituden aus B10 mit Triggerposition d	22
4.17	Seitenansicht des Vorwärtsspektrometers mit eingezeichnetem Detektorgerüst. Die Position des Aerogel-Čerenkov-Detektor ist hier hellblau hervorgehoben. (aus [11]).	23
4.18	Schematische Darstellung der Messelektronik für einen der zwölf Photomultiplier.	24
4.19	Signalverlauf aus Photomultiplier B4 für einen Run der zweiten Testmessung am BGO-OD Experiment.	25
4.20	Signalverlauf aus Photomultiplier P12 für einen Run der zweiten Testmessung am BGO-OD Experiment.	26
4.21	Histogramm mit allen Signalen des Photomultipliers B1 aus Run 47754.	26
4.22	Dargestellt ist die X-Projektion von Abbildung 4.21. Erkennbar ist das periodisch etwa alle 30 bis 40 ns eine Häufung von Signalen auftritt.	27
4.23	Multiplizität des Aerogel-Čerenkov-Detektors für den Run 47754.	28
A.1	Frontansicht des Detektors mit den durch a, b, c und d gekennzeichneten Positionen der Triggerszintillatoren.	33
A.2	Histogramm der SADC-Messung mit 2500 Evens für Photomultiplier B1.	34
A.3	Histogramm der SADC-Messung mit 2500 Evens für Photomultiplier P12.	34
A.4	Amplitudenverteilung der Signale aus Photomultiplier B1 bei $-2,1$ kV (Triggerposition a).	39
A.5	Amplitudenverteilung der Signale aus Photomultiplier P9 bei 2,1 kV (Triggerposition a).	39
A.6	Amplitudenverteilung der Signale aus Photomultiplier P9 bei 2,1 kV (Triggerposition a).	40

A.7	Amplitudenverteilung der Signalsumme von Photomultiplier B1, P12 und P9 bei $\pm 2,1$ kV (Triggerposition <i>a</i>).	40
A.8	(a) Frontansicht des Detektorgerüsts. (b) Seitenansicht des Gerüsts. In hellblau ist die Position des Aerogel-Čerenkov-Detektor angedeutet.	41
A.9	Signalverlauf aus Photomultiplier P8 aus der ersten Testmessung (Run 46011).	42
A.10	Signalverlauf aus Photomultiplier P8 aus der zweiten Testmessung (Run 47754).	42

Tabellenverzeichnis

3.1	Schwellengeschwindigkeit und Impuls für ein Aerogel mit Brechnugsindex $n = 1,05$. Als Vergleich sind desweiteren die Schwellen für Plexiglas mit $n = 1,49$ und CF_4 mit $n = 1,0005$ aufgeführt.	7
4.1	Ausgewählte Messungen für die vier Triggerpositionen und die dazugehörigen Ansprechwahrscheinlichkeiten der einzelnen Photomultiplier, sowie die aus der Signalsumme bestimmte Ansprechwahrscheinlichkeit. Des Weiteren sind die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung bestimmten Unsicherheiten der Ansprechwahrscheinlichkeiten angegeben.	21
A.1	Messungen die mit Triggerposition a durchgeführt wurden und die jeweils nach Gleichung 4.1 bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechneten Unsicherheiten bei einer Schwelle von 30 mV.	35
A.2	Messungen die mit Triggerposition b durchgeführt wurden und die jeweils nach Gleichung 4.1 bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechneten Unsicherheiten bei einer Schwelle von 30 mV.	36
A.3	Messungen die mit Triggerposition c durchgeführt wurden und die jeweils nach Gleichung 4.1 bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechneten Unsicherheiten bei einer Schwelle von 30 mV. Für die Messung mit Detektor B2 und P7 bei einer Hochspannung von 2,1 kV war der Detektor B4 versehentlich nicht korrekt mit dem SADC verbunden, daher bezieht sich die Ansprechwahrscheinlichkeit des Summensignal nur auf Detektor B2 und P7.	37
A.4	Messungen die mit Triggerposition d durchgeführt wurden und die jeweils nach Gleichung 4.1 bestimmten Ansprechwahrscheinlichkeiten, sowie die nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechneten Unsicherheiten bei einer Schwelle von 30 mV.	38