BACHELORARBEIT

von

Christian Spannfellner Mtr.Nr.: 03665256

REALISIERUNG DES ERSTEN PRECISION OPTICAL CALIBRATION MODULES FÜR DAS GIGATON VOLUME DETECTOR NEUTRINO TELESKOP IN BAIKAL

REALIZATION OF THE FIRST PRECISION OPTICAL CALIBRATION MODULE FOR THE GIGATON VOLUME DETECTOR NEUTRINO TELESCOPE IN BAIKAL



Technische Universität München

Fakultät für Physik

Erstgutachter (Themensteller):

Prof. Elisa Resconi

Zweitgutachter:

Prof. Lothar Oberauer

Abstract

REALISIERUNG DES ERSTEN PRECISION OPTICAL CALIBRATION MODULES (POCAM) FÜR DAS GIGATON VOLUME DETECTOR (GVD) NEUTRINO TELESKOP IN BAIKAL

Neutrinos sind durch ihren kleinen Wirkungsquerschnitt, ihrer Ladungsneutralität und ihrer verschwindenden Masse nur schwer nachzuweisen. Allerdings ermöglicht die Detektion von Neutrinos, insbesondere durch vorangegangene Eigenschaften, Informationen aus Vorgängen der Natur und des Universums zu erhalten, die mit anderen Methoden verschlossen blieben würden.

Das IceCube Projekt am Südpol und das Gigaton Volume Detector (GVD) Neutrino Telescope in Baikal werden die Erforschung der Neutrinos weiter vorantreiben und sollen unter anderem Informationen über die Neutrinooszillation und damit einhergehend der Neutrino-Massenhierarchie liefern.

Um die Kalibrierung in IceCube Gen2, einer geplanten Erweiterungen von IceCube, zu verbessern, wurde das in dieser Bachelorarbeit thematisierte Precision Optical Calibration Module (POCAM) konzipiert. Mittels einer isotropen Lichtquelle soll es mit gezielten Lichtpulsen die optischen Eigenschaften des Eises ermitteln und die Effizienz der Registriereinheiten innerhalb des Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU) verbessern.

Diese Bachelorarbeit begleitet die Realisierung des ersten POCAM Prototypen und dessen Einsatz und Test in GVD Baikal, einem Neutrino Teleskop in Russland. Einleitend dazu dient ein Überblick über die Geschichte der Neutrinophysik, des Standardmodells der Teilchenphysik, der Neutrinooszillation und der Neutrino-Massenhierarchie. Abgeschlossen wird das erste Kapitel mit dem Cherenkoveffekt, welcher die Grundlage für die Detektion von Neutrinos darstellt. Im Weiteren werden die beiden Detektoren IceCube und GVD Baikal mit ihren jeweiligen Registriermodulen genauer vorgestellt.

Der Hauptteil der Arbeit konzentriert sich auf die technische Realisierung des PO-CAM. Dabei stehen die elektronischen Komponenten und die Isotropie der Lichtquelle im Vordergrund. Abgeschlossen wird diese Arbeit durch einen Einblick in die Inbetriebnahme des ersten POCAM in GVD Baikal.

Abstract

REALIZATION OF THE FIRST PRECISION OPTICAL CALIBRATION MODULE (POCAM) FOR THE GIGATON VOLUME DETECTOR (GVD) NEUTRINO TELESCOPE IN BAIKAL

Due to the small cross section, the charge neutrality and the tiny mass of the neutrinos their detection is very difficult. Nevertheless the detection of neutrinos provides especially through their mentioned characteristics information about nature and universe, which could not be achieved with other methods.

The IceCube project, located on the southpole, and the Gigaton Volume Detector (GVD) Neutrino Telescope in Baikal will continue the neutrino studies and provide among others further information about the neutrinooscillation and the neutrino mass hierarchy.

To improve the calibration in IceCube Gen2, which is a planned expansion for IceCube, the Precision Optical Calibration Module (POCAM) was developed. The latter one is the main subject of this thesis. It provides an isotropic lightsource, which is capable to make controlled lightpulses. This should deliver information about the optical properties of the ice and improve the efficiency of the registrationmodules. This thesis accompanies the development of the first POCAM prototype and his deployment and testing in GVD Baikal, which is a Neutrino Telescope in Russia. Therefore the first chapter discusses the physics of neutrinos, the standard model of particle physics, the neutrinooscillation and the neutrino mass hierarchy. At last it gives an introduction to the cherenkov effect, which is the foundation for the detection of neutrinos. Furthermore the IceCube and GVD detectors will be introduced. The main part of this thesis concentrates on the technical realization of the PO-CAM. Therefore the focus lies on the electrical components and the isotropic light source. The thesis is closed by an insight in the deployment of the first POCAM in GVD Baikal.

Inhaltsverzeichnis

1	Neı	itrinos	i	1			
	1.1	Die N	eutrinohypothese	1			
	1.2	Nachv	veis der Neutrinos	3			
		1.2.1	Elektron–Neutrino ν_e	3			
		1.2.2	Myon–Neutrino ν_{μ}	4			
		1.2.3	Tau–Neutrino ν_{τ}	5			
	1.3	.3 Neutrinoflavours und das Standardmodell					
	1.4	Neutr	inooszillation im Vakuum	10			
	1.5	Neutr	ino-Massenhierarchie	13			
	1.6	Entste	ehung von Neutrinos	14			
		1.6.1	Solare Neutrinos	14			
		1.6.2	Atmosphärische Neutrinos	15			
		1.6.3	Neutrinos aus kosmischen Events	16			
	1.7	Chere	nkov Effekt	17			
2	Ice(Cube		19			
	2.1	IceCu	be South Pole Neutrino Observatory	19			
		2.1.1	In-Ice Array	19			
		2.1.2	DeepCore	20			
		2.1.3	ІсеТор	21			
		2.1.4	IceCube Laboratorium	21			
	2.2	IceCu	be Gen2	22			
	2.3	Digita	l Optical Module	23			
3	Gig	aton V	/olume Detector (GVD) Baikal	26			

4	PO	CAM -	Precision Optical Calibration Module	29
	4.1	Desigr	und Aufbau	29
	4.2	Analo	gboard	30
		4.2.1	Kapustinski Schaltkreis	31
		4.2.2	Auswahl der Light Emitting Diodes (LEDs)	33
		4.2.3	SiPM und Photodiode	35
	4.3	Digita	lboard	39
	4.4	Messu	ng der Isotropie	42
5	Inb	etriebr	nahme des ersten POCAM	46
6	Aus	blick		48

Das "Precision Optical Calibration Module" ist als Bestandteil einer geplanten Erweiterung eines Neutrino Detektors entworfen worden. Um die Arbeitsweise eines Detektors zu verstehen, benötigt man zunächst einen Einblick in die Natur der Neutrinos selbst. Dieser Einblick soll in dem ersten Kapitel dieser Bachelorarbeit gewährt werden.

1.1 Die Neutrinohypothese

Die β^+ - und β^- -Zerfälle eines Atomkerns konnten schon vor der Entdeckung der Neutrinos beobachtet werden. Nachgewiesen wurden im 20. Jahrhundert dabei die Konstituenten der nachstehenden Zerfälle.

$\beta^+: M(A,Z) \longrightarrow M(A,Z-1) + e^+$	${\not z}$ Energie- und Drehimpulserhaltung
$\beta^-: M(A, Z) \longrightarrow M(A, Z+1) + e^-$	4 Energie- und Drehimpulserhaltung

Somit wurden nur der rückgestoßene Kern und die emittierten Betateilchen (e^+, e^-) des Zerfalls beobachtet. Zunächst war nur der β^- Zerfall bekannt, da das Positron erst 2 Jahre nach der Postulierung des Neutrinos (1930) von Anderson entdeckt wurde, einer an dieser Stelle zu erfolgenden qualitativen Beschreibung soll dies aber nicht weiter hinderlich sein.

Da nur zwei Konstituenten nachgewiesen werden konnten, ging man, unter Beachtung der Energieerhaltung, von einem scharfen Spektrum der beteiligten Betateilchen aus. Entgegen der Erwartungen war das gemessene Spektrum hingegen kontinuierlich und konnte, gemäß Abbildung (1), keinen scharf begrenzten Peak aufweisen (S. 9f, [34]).

Die scheinbare Verletzung des Energieerhaltungssatzes war für die beteiligten Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen zunächst nicht nachvollziehbar. Erschwerend kam dabei die Verletzung der Drehimpulserhaltung bei obigen Zerfällen hinzu. Kerne mit einer geraden Massenzahl A haben ganzzahligen Spin und Kerne mit einer ungeraden Massenzahl haben einen halbzahligen Spin. Diese Spinstellung müsste auch der rückgestoßene Kern erfüllen, dies ist unter der Emission eines Betateilchens mit Spin $\frac{1}{2}$ aber nicht der Fall, die Drehimpulserhaltung ist verletzt (S. 9f, [34]).



Abbildung 1: Gemessenes Spektrum des β^- -Zerfalls (a), zu erwarten wäre bei einem Zweikörperzerfall ein scharfer Peak bei E_{max} (b) (S.10, [34]).

Erst Wolfgang Pauli postulierte, in Anbetracht der Verletzung der Energie- und Drehimpulserhaltung, die Existenz eines Weiteren an den Zerfällen beteiligten Teilchens. In einem offenen Brief an die physikalische Gesellschaft schrieb er im Dezember 1930 [31]:

"Liebe Radioaktive Damen und Herren!

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der falschen Statistik der Nund Li 6-Kerne, sowie des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen, um den Wechselsatz der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $\frac{1}{2}$ haben und das Ausschließungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten außerdem noch dadurch unterscheiden, daß sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Das kontinuierliche β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, daß beim β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, daß die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist."

Dabei könnten die postulierten neutralen Teilchen, das kontinuierliche Spektrum derart erklären, dass die freiwerdende Energie unterschiedlich stark auf das nachweisbare Betateilchen und die Neutrinos verteilt werden könnte. Auch der Wechselsatz der Statistik, welcher heute besser bekannt unter dem Paulischen Ausschließungsprinzip ist, konnte mit dem neuen Teilchen erfüllt werden, da dieses den Spin $\frac{1}{2}$ tragen würde. Damit ist auch die Drehimpulserhaltung gegeben. Pauli ging explizit auf das Ausschließungsprinzip ein, da zu jener Zeit nur Fermionen bekannt

waren. Die postulierten Teilchen wurden später von Fermi in Neutrino (little neutral one) umbenannt, um einer Verwechslung mit den in der Zwischenzeit entdeckten Neutronen entgegen zu wirken [35].

In Anbetracht der postulierten Neutrinos ergeben sich folgende Gleichungen für die korrekten β -Zerfälle (S. 9f, [34]).

$$\beta^+: M(A, Z) \longrightarrow M(A, Z-1) + e^+ + \nu_e \tag{1}$$

$$\beta^-: M(A, Z) \longrightarrow M(A, Z+1) + e^- + \bar{\nu}_e \tag{2}$$

1.2 Nachweis der Neutrinos

1.2.1 Elektron–Neutrino ν_e

Erst 26 Jahre später, kurz vor Wolfgang Paulis Tod, konnten die von ihm postulierten Elektronen-Neutrinos im Poltergeist-Experiment von Clyde L. Cowan und Frederick Reines, nachgewiesen werden. Für diesen Erfolg wurden sie mit dem Nobelpreis geehrt [35].

Grundlage für dieses Experiment war der Einfluss des Poltergeists, wie das Neutrino wegen seines schwierigen Nachweises und seiner Eigenschaften genannt wurde, auf die Auslösung eines inversen Betazerfalls, bei dem ein Proton durch die Reaktion mit einem Antineutrino zu einem Neutron und einem Positron zerfällt [34].

$$\bar{\nu}_e + p \longrightarrow n + e^+ \tag{3}$$

Als Neutrinoquelle verwendeten Cowan und Reines Kernreaktoren, um die bei den β^- -Zerfällen entstehenden Antineutrinos auszunutzen.

In mit Cadmiumchlorid (CdCl₂) und Wasser (H₂O) gefüllten Tanks können die Antineutrinos mit den Protonen des Wassers reagieren. Die beim inversen Betazerfall entstehenden Positronen annihilieren, gleich nach ihrer Entstehung, mit Elektronen unter der Emission von zwei Photonen der Energie 511keV [35].

$$e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma \tag{4}$$

Diese Photonen werden in entgegengesetzte Richtungen emittiert, wobei sie von an den Wänden angebrachten Photomultiplieren registriert werden können. Das Neutron wird hingegen durch das Wasser moderiert, bis es schließlich von einem Cadmiumkern eingefangen werden kann und diesen anregt. Sobald der Cadmiumkern wieder in den Grundzustand relaxiert, emittiert er ein Photon, welches die Photomultiplier verzeichnen können. Ausschlaggebend für den Nachweis von Neutrinos ist somit die zeitliche Differenz, verursacht durch die Moderation der Neutronen, zwischen den registrierten Events [35].

In Abbildung (2) ist eine Zeichnung des Experiments und eine schematische Darstellung des Versuchsablaufs illustriert.



Abbildung 2: Links: Zeichung des Experiments, bestehend aus drei Tanks, welche jeweils 1400 Liter fassen.

Rechts: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit dem eingezeichneten Ablauf des inversen Betazerfalls und des aufgenommenen Signals, inklusive der zeitlichen Verschiebung zwischen den Events [37].

Aus den Messungen von Cowan und Reines ergab sich ein Wirkungsquerschnitt der Antineutrinos von $\sigma_{\bar{v}_e} = (1.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2 \text{ (S. 12, [34])}.$

Dieser Wirkungsquerschnitt ist extrem klein und erklärt warum der Nachweis der Neutrinos so lange gedauert hat und noch immer nur schwer zu realisieren ist.

1.2.2 Myon–Neutrino ν_{μ}

Nach der Entdeckung des Myons 1936 von Carl D. Anderson und Seth Neddermayer stellte sich die Frage ob es eine weitere Neutrinoart, zugehörig zu den Myonen, gibt. Die Entdeckung dieses Myon-Neutrinos von Leon Lederman, Melvin Schwartz und Jack Steinberger wurde 1988 mit dem Nobelpreis geehrt. Im Weiteren soll daher auf das Experiment von Lederman, Schwartz und Steinberger am Brookhaven National Laboratory eingegangen werden [27].

Um einen konstanten Strahl an potentiellen Myon-Neutrinos zu erhalten, verwendete das Team der drei Physiker beschleunigte Protonen aus dem Alternating Gradient Synchrotron (AGS) in Brookhaven. Diese Protonen wurden auf leichte Targets geschossen um Pionen, eine Art von Mesonen (siehe hierzu Kapitel 1.3), zu erzeugen [22].

$$p + p \longrightarrow p + n + \pi^+ \tag{5}$$

Die erhaltenen geladenen Pionen zerfallen weiter zu Myonen und hypothetischen Myon-Neutrinos (S. 33, [34]).

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \tag{6}$$

Der entstandene Strahl, nun hauptsächlich aus obigen Konstituenten bestehend, musste eine 5000t schwere Stahlabschirmung aus Teilen von alten Kriegsschiffen überwinden. Diese konnten nur die Neutrinos passieren, alle anderen Teilchen wurden zurückgehalten. In der dahinter liegenden, mit Neon gefüllten, Funkenkammer konnten die Neutrinos mit Platten aus Aluminium reagieren und wieder Myonen auslösen [27].

$$\nu_{\mu} + n \longrightarrow p + \mu^{-} \tag{7}$$

Die Spur der Myon-Neutrinos entlang der Funkenkammer konnte mithilfe von Szintillationszählern detektiert und fotografiert werden und dient als Nachweis für deren Existenz [27].

1.2.3 Tau–Neutrino ν_{τ}

Seit der Entdeckung des Tau Leptons 1975 wurde stets auch die Existenz des Tau-Neutrinos angenommen. Bestätigt wurde dies aber erst im Jahre 2000 mit dem Direct Observation of Nu Tau (DONuT) Experiment.

Ahnlich der Erzeugung von Myon-Neutrinos nutzte man beim DONuT Experiment einen Protonenstrahl zur Erzeugung der Tau-Neutrinos. Die verwendeten Protonen hatten eine Energie von 800GeV und wurden vom Tevatron Beschleuniger bereitgestellt. Den Strahl richtete man auf einen Block aus Wolframlegierung, um analog Gleichung (5) Mesonen zu erzeugen. Der höheren Energie der Protonen war es zu verdanken, dass Mesonen entstanden, welche eine höherere Energie als Pionen besitzen [2].

$$D_s \longrightarrow \tau + \nu_{\tau}$$
 (8)

Der Hauptanteil der erhaltenen Tau-Neutrinos stammt aus dem Zerfall von D_s -Mesonen, welche ein Charm-Quark enthalten, siehe hierzu Abschnitt 1.3 [2].

Jedoch entstanden bei der Kollision mit der Wolframlegierung auch andere Teilchen, die es nun herauszufiltern galt. Für diesen Zweck waren direkt nach dem Wolframblock zwei große Dipolmagneten aufgebaut, deren Pole aus beruhigten Stahl gefertigt waren, das heißt eine besondere Reinheit aufwiesen. Diese Magneten dienten einerseits dazu geladene Teilchen aus dem Strahl abzuleiten und andererseits dazu hochenergetische Myonen abzulenken. Zusätzlich war nach den Magneten eine



Abbildung 3: Illustration der Erzeugung eines Neutrinostrahls im DONuT Experiment [29].

18m lange Stahlabschirmung verbaut, um alle Teilchen die keine Neutrinos sind herauszufiltern [2].

In Abbildung (3) ist die Erzeugung des Neutrinostrahls illustriert, des Weiteren findet sich in Abbildung (4) eine schematische Darstellung des Herzstückes des Detektors, der Detektionskammer des Experiments. In dieser reagieren die Tau-Neutrinos mit den Eisenkernen und es werden Tau-Leptonen erzeugt, diese können durch ihre charakteristische Spur, welche beim Zerfall der Leptonen abknickt, nachgewiesen werden. Die Unterscheidung der einzelnen Events und die Zuordnung zu den verschieden Leptonarten stellte einen immensen Aufwand dar, ist aber schlussendlich geglückt und das Tau-Neutrino konnte eindeutig nachgewiesen werden [2].





1.3 Neutrinoflavours und das Standardmodell

Die obigen Experimente dienen als Nachweise der Existenz von verschiedenen Leptonen $(e^{\pm}, \mu^{\pm}, \tau^{\pm})$ und deren zugehörigen (Anti-)Neutrinos. Für diese unterschiedlichen Arten der Neutrinos verwendet man den Begriff der Neutrinoflavours. Da Neutrinos einen halbzahligen Spin $(\frac{1}{2})$ aufweisen, zählen sie zu den Fermionen. Teilchen mit ganzzahligen Spins gehören zu den Bosonen.

Reaktionen an denen Neutrinos beteiligt sind können geladen (CC) oder ungeladen (NC) erfolgen. Die Abkürzungen stehen hierbei für Charged Current (CC) und Neutral Current (NC), untenstehende Reaktion veranschaulichen die unterschiedlichen Wechselwirkungen. Der l-Index dient als Platzhalter für die drei verschiedenen Leptonflavours $(e^{\pm}, \mu^{\pm}, \tau^{\pm})$ [2].

$$\bar{\nu}_l + N \longrightarrow l^+ + X \tag{9}$$

$$\nu_l + N \longrightarrow l^- + X \tag{10}$$

$$\bar{\nu}_l + N \longrightarrow \bar{\nu}_l + X$$
 (11)

$$\nu_l + N \longrightarrow \nu_l + X \tag{12}$$

Die Theorie des Standardmodells beschreibt die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen untereinander, dabei steht die Vereinheitlichung derer im Vordergrund. Die Wechselwirkungen der Elementarteilchen können als elektromagnetisch, schwach oder stark klassifiziert werden. Jede dieser Wechselwirkungen wird dabei über Austauschbosonen vermittelt, wobei die elektromagnetische über Gammaquanten, die starke über die Gluonen und die schwache Wechselwirkung über W^{\pm} - und Z^{0} -Bosonen übertragen wird.

Neutrinos unterliegen ausschließlich der schwachen Wechselwirkung, dies bedeutet, dass eine Reaktion an der Neutrinos beteiligt sind, immer eine schwache Wechselwirkung darstellt. Daraus folgt, dass bei CC-Events wie in Gleichung (9) und (10) ein positiv bzw. negativ geladenes W-Boson ausgetauscht wird (W^{\pm}) und bei NC-Events (Gleichung (11) und (12)) ein ungeladenes Z-Boson (Z^0). Einen Überblick über die unterschiedlichen Wechselwirkungen und deren Eigenschaften vermittelt nachstehende Tabelle (S. 205, [1] und [18]).

Wechselwirkung	stark	elektromagnetisch	schwach	
Koppelt an	Farbe	elektrische Ladung	schwache Ladung	
Austauschboson	8 Gluonen	Photon	W^{\pm}, Z^0	
Masse (GeV/c^2)	0	0	$\approx 10^2$	
Reichweite (m)	10^{-15}	∞	10^{-18}	
Kopplungsstärke	$\alpha_s \approx \frac{1}{10} - \frac{1}{2}$	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$	

Tabelle 1: Eigenschaften der Wechselwirkungen im Standardmodell.

Besondere Erwähnung sollte in diesem umfangreichen Thema, an dem stetig weitergeforscht wird, die starke Wechselwirkung finden. Dieser verdienen wir einige in den vorigen Kapiteln erwähnten Teilchen. So sind Protonen und Neutronen keine einzelnen Elementarteilchen, sondern aus Quarks und deren zusammenhaltenden Austauschbosonen, den Gluonen, zusammengesetzt. Aus Quarks bestehende Teilchen werden Hadronen genannt, diese sind in Mesonen und Baryonen unterteilt. Baryonen haben einen halbzahligen Spin (Fermionen) und sind aus drei Quarks zusammengesetzt, darunter zählen Neutronen (ein Up- und zwei Downquarks) sowie Protonen (ein Down- und zwei Upquarks).

Mesonen sind Quark-Antiquarkpaare und zählen somit, anders als Baryonen, zu den Bosonen, das heißt sie haben einen ganzzahligen Spin. Darunter zählen beispielsweise Pionen π^{\pm} (π^+ : Up- und Antidownquark, π^- : Down- und Antiupquark).

Eine Übersicht über die Elementarteilchen, deren Austauschbosonen und ihrer jeweiligen Eigenschaften findet sich in Abbildung (5) [1].



Abbildung 5: Standardmodell der Teilchenphysik, Auflistung der Elementarteilchen und ihrer Eigenschaften [30].

Trotz vieler Übereinstimmungen des Standardmodells mit experimentellen Befunden bleiben noch einige ungeklärte Fragen. So ist es noch nicht gelungen die Gravitationskraft als Wechselwirkung mit den Anderen zu vereinbaren.

Außerdem werden die Neutrinos im Standardmodell als masselos behandelt, dies steht aber im Gegensatz zur Neutrinooszillation, welcher sich das nachfolgende Kapitel widmet (S. 206, [1]).

Das Standardmodell der Elementarteilchen ist also derzeit zumindest noch unvollständig.

1.4 Neutrinooszillation im Vakuum

Die Detektion von solaren Neutrinos in Experimenten in den Siebzigern förderte einige Ungereimtheiten im Verhältnis der gemessenen Elektron-Neutrinos ans Tageslicht. Es wurden weitaus weniger Elektron-Neutrinos nachgewiesen als Berechnungen zuvor suggeriert haben. Auch weitere Experimente am Super-Kamiokande Detektor, in dem es auch möglich war Myon-Neutrinos nachzuweisen, wiesen Unstimmigkeiten im Verhältnis der Elektron- zu den Myon-Neutrinos auf. So schloss der Physiker Takaaki Kajita daraus, dass sich die Myon-Neutrinos auf dem Weg zum Detektor in Tau-Neutrinos verwandeln mussten, letztere konnten im Detektor nicht nachgewiesen werden. Die Idee der Neutrinooszillation war geboren [24].

Da eine solche Oszillation nur Teilchen mit einer nicht verschwindenden Masse und somit Energie vorbehalten ist, dient dies zugleich als Hinweis darauf, dass Neutrinos eine, wenn auch kleine, Masse besitzen müssen (S. 165f, [1]).

Auch Arthur B. McDonald kam bei Experimenten im Sudbury Neutrino Observatory in Kanada zu der gleichen Schlussfolgerung. Beide Physiker erhielten dafür 2015 den Nobelpreis der Physik [24].

Im Folgenden soll die Neutrinooszillation im Vakuum anhand quantenmechanischer Modelle verdeutlicht werden. Am Ende sollte es möglich sein, eine Wahrscheinlichkeit für den Wechsel eines Flavours anzugeben.

Die Beziehung zwischen den Flavourzuständen und den Masseneigenzuständen der Neutrinos ist durch die Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata Matrix (PKMS Matrix) gegeben.

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle\\ |\nu_{\mu}\rangle\\ |\nu_{\tau}\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3}\\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3}\\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle\\ |\nu_2\rangle\\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix}$$
(13)

In verkürzter Schreibweise gelten für die Umrechnung von Flavour- zu Masseneigenzuständen und umgekehrt somit nachstehende Gleichungen ($\alpha \in (e, \mu, \tau)$ und $j \in (1, 2, 3)$) [32].

Seite 11

$$|\nu_{\alpha}\rangle = \sum_{j} U_{\alpha j} |\nu_{j}\rangle, \ |\nu_{j}\rangle = \sum_{j} U_{\alpha j}^{*} |\nu_{\alpha}\rangle$$
(14)

Des Weiteren gilt für die PKMS Matrix noch nachstehende explizite Form.

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{\frac{i\alpha_1}{2}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{i\alpha_2}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(15)

Mit $c_{ij} = cos(\theta_{ij})$, $s_{ij} = sin(\theta_{ij})$ und θ_{ij} als Mischungswinkel. Die Parameter δ , α_1 und α_2 sind Phasen, welche die CP-Erhaltung verletzen. Unter CP versteht man die Hintereinanderausführung der Ladungskonjugation C (aus Teilchen wird Antiteilchen) und der Parität P (Raumspiegelung). Die Phasenwinkel α_1 und α_2 müssen nur bei Majorana-Neutrinos beachtet werden, ansonsten gilt $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$. Als Majorana bezeichnet man Neutrinos, bei denen das Antineutrino identisch zum Neutrino ist [32].

Um nun die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen zwei Teilchen zu berechnen, verwendet man die 2×2 PKMS Matrix, was sich ungleich vereinfachend auf die Rechnung auswirkt. Betrachtet soll der Übergang zwischen Elektron- und Myon-Neutrinos.

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle\\ |\nu_\mu\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta)\\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle\\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix}$$
(16)

Daraus ergibt sich für die Flavourzustände nach Formel (14) eine gemischte Darstellung aus den Masseneigenzuständen.

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle, \ |\nu_\mu\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle \tag{17}$$

Mithilfe der Zeitentwicklung können diese noch weiter umgeschrieben werden.

$$|\nu_j(t)\rangle = e^{-iE_{\nu_j}t} |\nu_j(0)\rangle \tag{18}$$

Da die Neutrinos ultra-relativistisch sind, ist ihre Energie durch nachstehende Gleichung gegeben.

$$E_{\nu_j} = \sqrt{p^2 c^2 + m_{\nu_j}^2 c^4} \approx pc(1 + \frac{1}{2} \frac{m_{\nu_j}^2 c^4}{p^2 c^2})$$
(19)

Die Wahrscheinlichkeit ein Elektron-Neutrino nach einer bestimmten Zeit t nachzuweisen, kann mithilfe von Formel (17) und deren Zeitentwicklung (18) berechnet werden.

$$P_{\nu_e \longrightarrow \nu_e} = |\langle \nu_e(t) \mid \nu_e \rangle|^2 = \cos^4\theta + \sin^4\theta + 2\cos^2\theta \sin^2\theta \cos(\frac{1}{2}\frac{\Delta m_{21}^2 c^4}{\hbar c}\frac{L}{pc}) \quad (20)$$

$$=1-\sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1}{4}\frac{\Delta m_{21}^2 c^4}{\hbar c}\frac{L}{pc}\right) \quad (21)$$

Wobei $\Delta m_{21}^2 = m_{\nu_2}^2 - m_{\nu_1}^2$ die Massendifferenz zwischen den Zuständen ν_1 und ν_2 bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit $P_{\nu_e \longrightarrow \nu_e}$ oszilliert somit mit dem Quotienten zwischen der, seit der Enstehung zurückgelegten, Strecke L = ct und dem Impuls p. Für die Wahrscheinlichkeit des Übergangs zwischen Elektron- und Myon-Neutrino folgt damit:

$$P_{\nu_e \longrightarrow \nu_\mu} = 1 - P_{\nu_e \longrightarrow \nu_e} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1}{4} \frac{\Delta m_{21}^2 c^4}{\hbar c} \frac{L}{pc}\right) \tag{22}$$



Abbildung 6: Oszillationskurve für die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen einem Elektron-Neutrino und einem Myon-Neutrino mit $\theta = 34^{\circ}$ und $\Delta m_{21}^2 = 8 \cdot 10^{-5} \frac{eV^2}{c^4}$ (S. 168, [1]).

Aus diesen Wahrscheinlichkeiten folgt auch, dass für masselose Neutrinos ($\Delta m_{21}^2 = 0$) keine Oszillation zu erwarten ist. Wie im vorangegangen Kapitel postuliert,

müssen somit Neutrinos eine nicht-verschwindende Masse besitzen. Andernfalls wäre $P_{\nu_e \longrightarrow \nu_e} = 1$ und $P_{\nu_e \longrightarrow \nu_\mu} = 0$ (S. 165f, [1]).

1.5 Neutrino-Massenhierarchie

Wie aus Formel (20) ersichtlich, kann man in Oszillationsexperimenten nur die Differenz der Massenquadrate ($\Delta m_{21}^2 = m_{\nu_2}^2 - m_{\nu_1}^2$) bestimmen, nicht aber deren Vorzeichen. Dadurch ergeben sich prinzipiell zwei Anordnungen der Massenhierarchie. Die normale Neutrino-Massenhierarchie (NMH) setzt als größte Masse m_3 fest, die Invertierte bezeichnet hingegen m_2 als größte Masse.

Die jeweilige kleinste Masse könnte in beiden Fällen null gesetzt werden, womit sich die einzelnen Massen berechnen lassen. Im Falle der normalen Anordnung bezeichnet man diese Annahme als normale Hierarchie (S. 177f, [1]).



Abbildung 7: Links: Normale Neutrino-Massenhierarchie (NMH). Rechts: Invertierte Anordnung der Massen in der NMH (S. 177, [1]).

Durch diese Annahme können die Massen aus den in Experimenten gewonnen Werten berechnet werden. Aus der normalen Hierarchie folgen nachstehende Werte (S. 177f, [1]).

$$m_2 = \sqrt{\Delta m_{21}^2} \approx 0.009 \frac{eV}{c^2}, \ m_3 = \sqrt{\Delta m_{31}^2} \approx 0.05 \frac{eV}{c^2}$$
 (23)

Analog folgt aus der invertierten Hierarchie für die Masse von m_1 :

$$m_2 \approx m_1 = \sqrt{\Delta m_{31}^2} \approx 0.05 \frac{eV}{c^2} \tag{24}$$

Die resultierenden Massen sind, wie erwartet, viel kleiner als die Massen anderer Fermionen (S. 177f, [1]).

Eine Abbildung der invertierten und der normalen Neutrino-Massenhierarchie spiegelt sich in Abbildung (7) wieder.

1.6 Entstehung von Neutrinos

Neutrinos können an einer Vielzahl von Orten durch verschiedene Reaktionen entstehen. Neben den schon besprochenen Betazerfällen, welche zur Neutrinohypothese führten, sind für die Detektion in IceCube und Baikal GVD vor allem solare, atmosphärische und Neutrinos aus kosmischen Ereignissen von großer Wichtigkeit. Da diese Detektoren fernab von radioaktiven Quellen wie Kernreaktoren oder reaktiven Gesteinsarten sind, werden dort größtenteils nur Neutrinos gemessen, welche bei letztgenannten Reaktionen entstehen. Auf diese drei Quellen soll im Nachfolgenden weiter eingegangen werden. Die Neutrino Detektion bietet bei der Beobachtung dieser Ereignisse im Universum die Möglichkeit Einblick in Vorgänge zu erhalten, welche bei anderen Forschungsmethoden verborgen blieben würden.

1.6.1 Solare Neutrinos

Die in der Sonne stattfindende Kernfusion entsteht hauptsächlich über zwei verschiedene Prozesse, zum Einen über die pp-Kette und zum Anderen über den CNO-Zyklus (Bethe-Weizsäcker-Zyklus). Wobei letztgenannter nur einen Beitrag von 1.6% zur Energieerzeugung beiträgt, der weitaus größere Anteil mit 98.4% resultiert aus der pp-Kette. Die exotherme Nettokernfusionsreaktion, welche die Energie der Sonne erzeugt kann nachstehender Gleichung entnommen werden (S. 330ff, [34]).

$$4p \longrightarrow {}^{4}He + 2e^{+} + 2\nu_e + Q \tag{25}$$

Die beiden Positronen annihilieren nach ihrer Erzeugung sofort mit Elektronen.

$$e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma \tag{26}$$

Damit kann man die Fusionsreaktion aus Gleichung (25) in die ablaufende Nettoreaktion für die Energieerzeugung der Sonne umschreiben (S. 330ff, [34]).

$$2e^- + 4p \longrightarrow {}^4He + 2\nu_e + 26,73 \text{MeV}$$
 (27)

Pro Fusion wird somit eine Energie von $Q = 4m_p + 2m_e - m_{He} = 26,73$ MeV, unter Vernachlässigung der Neutrinomassen, erzeugt. Von dieser Energie entfallen nur ca. 2% auf die Neutrinos, der Rest ist thermische Energie der Sonne. Neben der emittierten Wärme und dem Licht der Sonne treffen also auch in der Kernfusion erzeugte Neutrinos auf die Erde.

Mithilfe der Solarkonstante ($\phi = 1376 \frac{W}{m^2} \approx 8.5 \cdot 10^{11} \frac{MeV}{cm^2s}$), die die mittleren auf die Erde auftreffende Energiemenge der Sonne pro Sekunde und Quadratmeter angibt, kann der eintreffende Neutrinofluss auf die Erde bestimmt werden. Pro Fusionsreaktion entstehen zwei Neutrinos und unter Berücksichtigung dieses Faktors errechnet sich nachstehender Neutrinofluss (S. 170, [1]).

$$\phi_{\nu} = 2 \cdot \frac{\phi}{Q} = 6 \cdot 10^{10} \frac{1}{\mathrm{m}^2 \mathrm{s}} \tag{28}$$

1.6.2 Atmosphärische Neutrinos

Die Erde ist einem stetigen Schauer von kosmischen Teilchen ausgesetzt, ca. 99% davon sind Hadronen (hauptsächlich Protonen) etwa 1% entfällt auf Elektronen und 0.01% sind Photonen. Die Protonen reagieren mit den in der Erdatmosphäre befindlichen Teilchen derart, dass unter anderem Mesonen, wie die schon erwähnten Pionen und Kaonen, entstehen können (S. 322ff, [34]).

$$p + N \longrightarrow \pi^{\pm}$$
 (29)

$$p + N \longrightarrow K^{\pm}$$
 (30)

Die entstandenen Mesonen sind aus einem Quark-Antiquarkpaar zusammengesetzt und können unter Aussendung von Neutrinos zerfallen, sofern sie nicht selbst wieder in der Atmosphäre wechselwirken. Im Folgenden soll als Beispiel nur der Zerfallsprozess der Pionen betrachtet werden, für Kaonen gilt dieser analog (S. 322ff, [34]).

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \tag{31}$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \tag{32}$$

Die entstanden geladenen Myonen zerfallen im Weiteren in Elektron- und Myon-Neutrinos.

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \tag{33}$$

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \tag{34}$$

Dieser in der Atmosphäre entstehende Neutrino- und Teilchenschauer trifft auf die Erde. Das Verhältnis der dabei entstehenden Myon-Neutrinos und -Antineutrinos zu den Elektron-Neutrinos und -Antineutrinos ist dabei um einen Faktor 2 höher und kann aus obigen beschriebenen Zerfällen ermittelt werden (S. 322ff, [34]).

$$r = \frac{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \approx 2, \quad \frac{\bar{\nu}_{\mu}}{\nu_{\mu}} \approx 1 \tag{35}$$

Dieses Verhältnis konnte in den Detektoren des Super-Kamiokande und im Sudbury Neutrino Observatory, wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, nicht reproduziert werden. Dies gab den Anstoß für die besprochene Neutrinooszillation.

1.6.3 Neutrinos aus kosmischen Events

Zur Vervollständigung dieses Teilkapitels soll an dieser Stelle noch die Entstehung von Neutrinos aus Supernovae Explosionen und Neutrinos als Bestandteil der kosmischen Hintergrundstrahlung besprochen werden.

In den Detektoren von IceCube und Baikal GVD können auch Neutrinos nachgewiesen werden, die aus **Supernovae Explosionen** stammen. Die dabei entstehenden Neutrinoausbrüche liefern Informationen über die Vorgänge bei Supernovae Explosionen. Die letzte solche Explosion konnte am 23.2.1987 in der Großen Mangelanschen Wolke beobachten werden, welche ca. $1.63 \cdot 10^5$ Lichtjahre von der Erde entfernt ist. Wegen der geringen Häufigkeit von Supernovae Explosionen können leider nur selten neue Schlüsse aus solchen Ereignissen gezogen werden (S. 362f, [34]).

Kosmologische Neutrinos, welche Überbleibsel aus dem Urknall darstellen und Teil der kosmischen Hintergrundstrahlung sind, haben einen sehr kleinen Wirkungsquerschnitt ($\sigma = 1 \cdot 10^{-54} cm^2$) und sind damit noch schwieriger nachzuweisen als anderweitig entstandene Neutrinos. Nur Detektoren, welche ein großes Volumen ausfüllen, haben die benötigten Kapazitäten um diese Neutrinos effizient nachzuweisen (S. 378, [34]).

1.7 Cherenkov Effekt

Ausschlaggebend für die Detektion von Neutrinos in IceCube und GVD ist der sogenannte Cherenkoveffekt, dieser tritt auf, sobald geladene Teilchen in einem Medium mit Brechungsindex n schneller sind als die Lichtgeschwindigkeit im Medium.

$$v_l > \frac{c_0}{n} \tag{36}$$

Die Bezeichnung c_0 steht für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Neutrinos die eine Reaktion wie in Gleichung (9) oder (10) verursachen, können geladene Leptonen mit der Geschwindigkeit v_l auslösen. Diese Leptonen können die Atome des Mediums kurzzeitig polarisieren und die zeitliche Änderung des Dipolfeldes induziert elektromagnetische Wellen. Sobald das geladene Lepton schneller als das Licht im Medium ist, können sich die gebildeten Wellen konstruktiv überlagern und es kommt zu einer Abstrahlung von Licht unter einem bestimmten Winkel. Falls das Lepton jedoch Gleichung (36) nicht erfüllt, relaxieren die gebildeten Dipole des Mediums zu schnell und die erzeugten Wellen überlagern sich destruktiv, siehe hierfür Abbildung (8) [3].



Abbildung 8: Ausrichtung der Dipole entlang der Bahn des geladenen Teilchens. Links löschen sich die elektromagnetischen Wellen aus und rechts interferieren sie konstruktiv [23].

Das entstandene Cherenkov-Licht wird unter einem Kegel emittiert, wobei der Abstrahlungswinkel θ durch Gleichung (37) gegeben ist (S. 415, [1]).

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n\beta} \tag{37}$$

Hierbei bezeichnet $\beta = \frac{v_l}{c_0}$ die Geschwindigkeit des Teilchens und n den Brechnungsindex des Materials. Zur Veranschaulichung des Abstrahlwinkels und der entstehenden Strahlung dient Abbildung (9) (S. 415, [1]).



Abbildung 9: Enstehung von elektromagnetischen Wellen, welche kugelförmig entlang der Bahn des geladenen Teilchens abgestrahlt werden [26].

Mithilfe des Cherenkov Effekts können Neutrinos über den Nachweis des erzeugten Lichts indirekt in den Detektoren nachgewiesen werden. Dabei werden durch viele Photosensoren, wie beispielsweise durch Photomultiplier Tubes (PMTs), das entstandene Licht registriert. Durch weitere Auswertung kann die Energie, der Flavour und die Herkunft des Neutrinos bestimmt werden.

Der Cherenkov Effekt ist im Übrigen auch der Grund dafür, dass die Abklingbecken in Kernreaktoren bläulich leuchten.

Zur Erinnerung sind an dieser Stelle nochmal die möglichen Interaktionen von Neutrinos mit Materie wiedergegeben (S. 2, [2]).

$$\bar{\nu}_l, \ (\nu_l) + N \longrightarrow l^+, \ (l^-) + X$$
 (38)

$$\bar{\nu}_l, \ (\nu_l) + N \longrightarrow \bar{\nu}_l, \ (\nu_l) + X$$
 (39)

Bei geladenen Reaktionen (CC), wie in Gleichung (38) können die ausgelösten geladenen Leptonen in den Detektoren, bei genügend hoher Geschwindigkeit, direkt durch den Cherenkov Effekt nachgewiesen werden. Im Falle der Erzeugung von Hadronen, also bei neutralen Strömen (Gleichung (39)), können diese Ströme bei der Interaktion mit den Quarks von Hadronen Kaskaden auslösen, bei denen geladene Events mit entsprechender Geschwindigkeit wiederum Cherenkov Strahlung auslösen (S. 2, [2]).

2 IceCube

Da das Precision Optical Calibration Module (POCAM) für das IceCube Experiment konzipiert wurde, soll letzteres innerhalb dieses Kapitels vorgestellt werden. Eingegangen wird dabei auf den Detektor selbst, die Digital Optical Modules und die geplanten Erweiterungen des Detektors.

2.1 IceCube South Pole Neutrino Observatory

Das IceCube Neutrino Observatorium ist ein Detektor speziell für den Nachweis von Neutrinos. Eingebettet in das ewige Eis am Südpol, nutzt er den Cherenkov-Effekt aus, um Neutrinos zu detektieren und Rückschlüsse auf deren Herkunft, Energie und Entstehung zu ziehen. Neutrinos können dabei einen ganz besonderen Blickwinkel auf das Universum eröffnen, da sie aufgrund ihrer Ladungsneutralität und ihrer verschwindenden Masse nahezu ungehindert durch Materie dringen können. Dadurch ermöglichen sie durch ihren Nachweis, wenngleich dieser auch durch vorangegangene Eigenschaften erschwert wird, die Gewinnung von wertvollen Informationen über die Entstehung von Neutrinos, der Neutrinooszillation und der Neutrinomassen [33].

Für den Nachweis von hochenergetischen, kosmischen Neutrinos sind im Eis 5160 Digital Optical Modules (DOMs) eingelassen, welche unter anderem mit Photomultiplieren bestückt sind, um die Spuren der Neutrinos nachzuverfolgen. Insgesamt erstreckt sich das Experiment auf einen Kubikkilometer Fläche, wobei die DOMs in 86 Strängen in das Eis eingelassen sind. Diese enorme Fläche ist dem niedrigen Wirkungsquerschnitt der Neutrinos geschuldet, je größer das Volumen des Detektors, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit Neutrinos nachweisen zu können [4].

2.1.1 In-Ice Array

Um den Cherenkov Effekt ausnutzen zu können, verwendet man die optischen Eigenschaften des Eises als Medium. Das Eis in der Antarktis bietet mit seiner Dicke, der Beständigkeit und seiner hohen Transparenz dabei die perfekte Voraussetzung.

Das In-Ice Array des IceCube nimmt die größte Fläche des gesamten Experiments ein. Insgesamt wurden hierbei 86 Strings in das Eis eingelassen. Jeder String ist mit 60 DOMs bestückt und wurde in einer Tiefe zwischen 1450m und 2450m über ein Hot-Water-Drilling Verfahren in das Eis gebettet. Die Strings sind in einem horizontalen Abstand von 125m in einem hexagonalen Gitter zueinander angeordnet. Durch diese Anordnung können Neutrinos in einem Energiebereich in der Größenordnung von TeV bis zu PeV detektiert werden. Insgesamt besteht das In-Ice Array also aus 5160 DOMs. Eine schematische Abbildung des IceCube findet sich in Abbildung (10) [4].



Abbildung 10: Schematische Abbildung des IceCube Experiments, gut zu erkennen ist die hexagonale Anordnung der Strings. Als Größenvergleich dient der Eiffelturm in Paris [4].

2.1.2 DeepCore

Ein Teil der DOMs innerhalb des Eises ist in einer Tiefe von unter 1750m platziert. Das dort ausgefüllte Volumen ist dichter mit DOMs bestückt als im übrigen In-Ice Array. Dieser Teil von IceCube wird DeepCore genannt und besteht, neben den 7 Standardstrings, aus 8 weiteren speziellen Strings, wobei der Abstand der Strings in DeepCore zwischen 41m und 105m variiert. Die 8 speziellen Strings für DeepCore haben einen Abstand zwischen den unteren 50 DOMs von ca. 7m und liegen in einer Tiefe von 2100 bis 2450m. Die verbleibenden zehn DOMs sind um eine Tiefe von 2000m platziert und haben einen Abstand von ca. 10m zueinander. Diese zehn DOMs dienen als Veto Cap für DeepCore und erlauben damit eine bessere Identifizierung von atmosphärischen Myonen. Zwischen 2000m und 2100m sind keine DOMs angebracht, da in dieser Region die Streuung und Absorption des Eises deutlich erhöht sind. Diese schlechteren Eigenschaften des Eises verhindern eine akzeptable Messung von eingehenden Events.

Sechs der speziell auf DeepCore ausgerichteten Strings sind mit DOMs bestückt, welche eine 35% höhere Quanteneffizienz haben. Die beiden anderen Strings sind

mit einer Mischung aus Standard-DOMs und den DeepCore-DOMs ausgestattet. Diese Bestückung verringert die Detektionsenergie für die Neutrinos, welche bei DeepCore bei Neutrinoenergien von 10GeV bis 100GeV liegt. Dieser Energiebereich ermöglicht die Detektion von atmosphärischen Neutrinooszillationen, Neutrinos aus der Annihilation mit Dunkler Materie und Neutrinos aus Supernovae [4].

2.1.3 IceTop

IceTop befindet sich auf der Oberfläche des Eises und besteht aus 162 mit Eis gefüllten Tanks. Diese sind mit Photomultiplier Tubes (PMTs) bestückt, um kosmische Teilchenschauer unter Ausnutzung des Cherenkov Effekts zu detektieren. Die Anlage befindet sich 2835m über dem Meeresspiegel und ist in 81 Stationen aufgeteilt, die genauso wie das In-Ice Array ein hexagonales Gitter formen. Die einzelnen Stationen bestehen aus zwei Tanks in einem Abstand von 10m. Jeder dieser Tanks ist mit zwei verschiedenen DOMs ausgestattet, die einen unterschiedlichen Verstärkungsfaktor aufweisen. Wobei dies die Verstärkung der PMTs betrifft, diese operieren bei einem niedrigen Verstärkungsfaktor von 10^5 bzw. einem höheren Faktor von $5 \cdot 10^6$, um das Spektrum der kosmischen Teilchenschauer optimal abzudecken. Ähnlich zu DeepCore gibt es in IceTop ein dichter besiedeltes inneres Gebiet, welches von acht Stationen geformt wird. In diesem Abschnitt können kosmische Partikel ab einer Energie von 100 TeV registriert werden, im restlichen IceTop liegt die Auslösungsenergie hingegen im PeV bis zu EeV Bereich. Das IceTop Array kann benutzt werden um die Strahlungseffekte von Sonneneruptionen, Gammastrahlen im PeV-Bereich und hochenergetische Myonen zu erforschen [4].

2.1.4 IceCube Laboratorium

Im IceCube Laboratorium laufen die Kabel der Arrays in zwei Kabeltürmen zusammen. Aufgebaut in der Mitte von IceCube ist es die zentrale Verwaltungsstelle, in der die aufgenommenen Daten in einem Serverraum verarbeitet werden können. Der Serverraum beherbergt das sogenannte South Pole System, welches zur Datenverarbeitung und -filterung dient.

Das Gebäude ist auf eine Temperatur von 18°C temperiert, wobei ein konstanter Luftstrom den Serverraum vor der Überhitzung schützt. Des Weiteren ist der Serverraum auf der zweiten Etage mit einem Metallgitter abgeschirmt, um elektromagnetische Störungen zu vermeiden. Diese Abschirmung ist auch mit den einzelnen Abschirmungen an den Anbindungskabeln verbunden. Eine Zeichnung des IceCube Labors findet sich in Abbildung (11) [4].



Abbildung 11: Darstellung des IceCube Laboratoriums, links und rechts sind die Kabeltürme zu erkennen. Auf der zweiten Etage befindet sich der Serverraum [4].

2.2 IceCube Gen2

Das IceCube Generation 2 Upgrade ist eine geplante Erweiterung des IceCube Experiments am Südpol und soll dieses auf ein Gesamtvolumen von 10km³ ausweiten. Bestehend aus einem In-Ice Array für hoch-energetische Neutrinos, einem In-Ice Infill Array (PINGU - Precision IceCube Next Generation Update) für niederenergetische Detektion, einem Oberflächen Array für kosmische Teilchenschauer und eventuell einem weiteren Oberflächen Array aus Radioantennen wird es einen großen Schritt für die weitere Erforschung der Neutrinooszillation einhergehend mit der Neutrino-Massenhierachie und Neutrinos aus kosmischen Events machen [33]. Dieser Abschnitt der Arbeit wird sich im Folgenden näher mit den geplanten Erweiterungen auseinandersetzen, da diese auch das Haupteinsatzgebiet des neu entwickelten POCAM darstellen werden.

Das **erweiterte In-Ice Array** bietet einen erhöhten Abstand zwischen den Strings, um das effektive Detektionsvolumen bis auf ein Zehnfaches des bisherigen Volumens zu erweiterten. Hierbei soll der Fokus auf Neutrinoenergien im PeV Bereich liegen und somit die Detektion und Charakterisierung von astrophysikalischen Neutrinoquellen ermöglichen. Einen Größenvergleich zwischen Generation 1 und 2 bietet Abbildung (12) [4].

Das **Precision IceCube Next Generation Update (PINGU)** vereinnahmt sechs Megatonnen an Eis innerhalb des DeepCore. Hauptziel von PINGU ist es durch eine dichtere Anordnung der DOMs die Detektion von atmosphärischen Neutrinos zu verbessern. Dies dient Messungen zur Neutrinooszillation ab einer Energie im GeV Bereich, der Erforschung der Neutrino-Massenhierarchie und der Suche nach Dunkler Materie ab einigen GeV. PINGU stellt des Weiteren das Haupteinsatzgebiet des POCAM als verbesserte Kalibriereinheiten dar. Dabei soll es helfen die optischen Eigenschaften des Eises näher zu bestimmen und damit die Rekonstruierung von Events zu verbessern.



Abbildung 12: Größenvergleich zwischen dem bestehenden IceCube Experiment und der geplanten Erweiterung des Gen2 Upgrades. In rot dargestellt ist die derzeitige IceCube Konfiguration, grün der DeepCore, wobei das graue Volumen innerhalb DeepCore die PINGU Erweiterung zeigt. Die geplante Vergrößerung des Detektionsvolumes innerhalb von Gen2 ist blau schattiert [15].

Ein **vergrößertes Oberflächenarray**, ausgelegt auf einen Durchmesser von mehreren In-Ice Arrays, erlaubt die Erforschung von kosmischen Teilchenschauern und ermöglicht ein Veto Cap für nach unten strömende Neutrinos.

Das im Oberflächenarray enthaltene **Radioantennen Array** ebnet den Weg für die Durchführung von Radiofrequenz-Messungen. Diese relativ neue Technologie ermöglicht Messungen im Energiebereich von 10^{18} eV. In diesem werden Neutrinos vermutet, welche aus der Streuung von ultrahochenergetischen kosmischen Teilchen an der Hintergrundstrahlung entstehen. Die Verknüpfung von optischen und radiofrequenten Messungen schafft eine Breite von Möglichkeiten für die Forschung im Gebiet der Astro- und Teilchenphysik [4].

2.3 Digital Optical Module

Die Digital Optical Modules (DOMs) sind das zentrale Herzstück des IceCube Experiments. Mit ihren eingebauten Photomuliplier Tubes (PMTs) sind sie sowohl zuständig für die optische Detektion als auch der Datenerfassung und -weitergabe. Eingefasst in eine sphärische Glaskuppel füllt die nach unten zeigende PMT mit ihren Durchmesser von zehn Zoll schon die untere Hemisphäre aus. Im oberen Bereich des DOMs ist unter anderem ein Mainboard verbaut, welches für die analoge und digitale Signalverarbeitung zuständig ist. Des Weiteren befindet sich dort auf einer seperaten Platine die Stromversorgung für die PMT und ein LED-Flasher-Board für die Kalibrierung. Außerdem beinhaltet die obere Hemisphäre ein Delay-Board, um eine Verzögerung zwischen den PMT-Signalen für die Auswertung zu erreichen. Einen Einblick in den Aufbau und ein Funktionsschaltbild der DOMs erhält man in Abbildung (13) [6].



Abbildung 13: Links: Überblick über den Aufbau eines DOM mit Beschriftung der einzelnen Komponenten. Rechts: Funktionsschaltbild des DOM [4].

Das umgebende Glas der Sphäre hat eine Stärke von einem halben Zoll und kann Drücken von bis zu 70MPa standhalten. Die PMT ist darüber hinaus noch von einem Netz aus Mu-Metall (einer Nickel-Eisen-Legierung) umgeben, die es vor dem terrestrischen Magnetfeld schützt und die Leistung der PMT verbessert.

Über ein spezielles Bohrverfahren mit heißem Wasser (Hot-Water-Drilling) können die mit DOMs bestückten Strings in das Eis eingelassen werden. Das nach kurzer Zeit zufrierende Wasser gewährleistet dabei eine optimale optische Anbindung an das restliche Eis. Die Verbindung der DOMs untereinander, sowie die Anbindung zum Laboratorium, welche die Spannungsversorgung und den Datentransfer ermöglicht, kann man Abbildung (14) entnehmen [6].

Das LED-Flasher-Board wird genutzt um die optischen Eigenschaften des Eises, die Anordnung der DOMs im Eis und die Dauer der Signalübertragung der DOMs zu bestimmen. Außerdem werden damit die Algorithmen zur Schauerrekonstruktion verifiziert. Zu diesem Zweck sind an der Kante der runden Platine insgesamt zwölf LEDs in sechs Paaren gleichmäßig zueinander in einem Winkel von 60° angeordnet. Jeweils eine LED des Paares zeigt in einem Winkel von 10.7° nach unten. Nachdem das Licht an der Kante des Übergangs der DOMs zum Eis gebrochen wurde, emit-



Abbildung 14: Links: DOM wie er im Eis an der Aufhängung im Eis eingelassen ist. Rechts: Verbindung von 4 DOMs untereinander und weitere Kabelführung zur Oberfläche bzw. zu unterliegenden DOMs [4].

tiert die LED das Licht horizontal in das Eis. Die andere LED ist in einem Winkel von 51.6° nach oben gerichtet. Nach der Brechung emittiert sie das Licht in einem Winkel von 48° nach oben, dies ist im Bereich des Cherenkovwinkels im Eis [4].

Um eine weniger fehlerbehaftete Kalibrierung zu ermöglichen, wäre es von Vorteil eine homogene und isotrope Lichtquelle zur Verfügung zu haben, die ihr Licht gleichmäßig in das Eis abstrahlt. Dies soll in Zukunft unter anderem durch das neu entwickelte und in dieser Arbeit thematisierte Precision Optical Calibration Module (POCAM) möglich sein und somit die Genauigkeit der Messungen verbessern.

3 Gigaton Volume Detector (GVD) Baikal

Das erste Precision Optical Calibration Modul hat seinen Dienst im Gigaton Volume Detector aufgenommen. Daher wird sich dieses Kapitel der Vorstellung des Detektors am Baikalsee widmen. Nach dem erfolgreichen Aufbau und vielversprechenden Ergebnissen des ersten, am Lake Baikal errichten, Detektors NT200 und dessen Upgrade NT200+ wurde die Planung des Baikal GVD Neutrino Teleskops in die Wege geleitet (S. 28, [14]).

Ausgerichtet auf die Detektion der von Neutrinoreaktionen ausgelösten Myonen und aus hadronischen Schauern entstehenden Cherenkov Strahlung, soll der Detektor bis Ende 2020 ein Volumen von 0.4km³ ausfüllen. Potentielle Nachweise soll GVD für die Reaktionen von Neutrinos, deren Gammastrahlen-Energien im GeV bis TeV Bereich liegen, liefern. Diesen stammen beispielsweise aus Aktiven Galaxienkernen (Active Galatic Nucleus (AGN)), Supernovaüberresten (Supernova Remnant (SNR)) und Gammablitzen (Gamma Ray Bursts (GRB)). Außerdem soll das Experiment der Erforschung von Dunkler Materie dienen (S. 2, [5]).

Der Detektor setzt dabei auf ein Zusammenspiel von Optical Modules (OMs), welche abschnittsweise auf die einzelne Strings verteilt sind, und die Anordnung der Strings zu Clustern. Der Baikalsee bietet mit seiner Tiefe von 1300m ab einer Entfernung von drei Kilometern zum Ufer, seiner Absorptionslänge von ca. 20-25m und einer Streulänge von 30-50m geeignete Voraussetzungen für die Detektion. Darüber hinaus erleichtert die in den Wintermonaten zugefrorene Oberfläche des Sees die Installation der Strings in das Wasser erheblich (S. 2, [5]).

Die Strings sind jeweils in drei bis vier Abschnitte mit OMs aufgeteilt, wobei jeder Abschnitt aus 12-16 OMs und einem Central Module (CU) besteht. Jeder Abschnitt formt somit eine eigene Detection Unit (DU). Das CU sammelt die Signale der PMTs in den OMs und wandelt sie mittels Analog/Digital-Converter (ADC) in ein digitales Signal um, welches mittels einem Field Programmable Gate Array (FPGA) weiterverarbeitet bzw. -gesendet wird. Ein zentrales Data Acquisition Center (DAQ) auf der Oberfläche dient zur Datenerfassung (S. 29, [14]).

Das erste Cluster Dubna wurde im April 2015 positioniert und in Betrieb genommen. Es besteht aus insgesamt 192 OMs, angeordnet in acht Strings mit je einer Länge von 345m. Die 24 OMs eines Strings sind in einem Abstand von 15m in einer Tiefe von 900m bis 1250m in zwei Detection Units angeordnet. Ein zusätzlicher String (nicht in Abbildung (15) zu sehen) beherbergt Equipment für die Kalibrierung des Arrays und für die Aufnahme von Umwelteinflüssen (S. 2, [5]).

Im April 2016 erhielt das Cluster ein Upgrade auf insgesamt 288 OMs in einer Tiefe zwischen 750m und 1275m [11].

Rechnet man diese Anzahl an OMs für die 27 geplanten Cluster um, könnte das gesamte GVD Projekt aus 7776 OMs bestehen. Insgesamt soll der Detektor, mit den Erweiterungen nach 2020, ein Volumen von 1.5km^3 erfassen [19].



Abbildung 15: Links: Geplante Konfiguration des Gigaton Volume Detectors im Lake Baikal, bestehend aus 27 Clustern. Rechts unten im Bild ist ein einzelner Cluster mit den acht Strings.

Rechts: Der erste installierte Cluster Dubna, jeweils 12 Optical Modules und ein Central Module formen eine Detection Unit [5].

Abbildung (15) bietet eine schematische Ansicht des GVD Neutrino Teleskops und des ersten installierten Clusters Dubna. Hierbei ist zu beachten, dass die Darstellung insgesamt 27 Cluster zeigt und damit weitere geplante Erweiterungen nach 2020 berücksichtigt [19].

Abschließend soll an dieser Stelle eine kurze Beschreibung der Optical Modules (OMs) folgen. Diese stellen analog der DOMs in IceCube die zentrale Registriereinheit dar und haben einen ähnlichen Aufbau. In einer Glassphäre mit einem Durchmesser von 43.2cm sind die Photomultiplier Tubes mit einem Durchmesser von zehn Zoll, ein Gitter aus Mu-Metall zur Abschirmung des Erdmagnetfeldes, eine LED Kalibriereinheit und elektronische Elemente, unter anderem zur Verstärkung und Stromversorgung, verbaut. Ein Kontrollboard übernimmt noch zusätzlich die Einstellung der PMT Hochspannung, Kalibrierung der Einheiten durch die LED Lichtquellen und die Aufnahme von Temperatur und Spannung. In Abbildung (16) ist ein Optical Modul und dessen zugehöriges Blockschaltdiagramm schematisch dargestellt ([5] und S. 35ff, [14]).



Abbildung 16: Links: Darstellung des OMs, zu sehen ist die untenliegende PMT und das abschirmende Mu-Metall Gitter. Oben sind die elektronische Bauelemente illustriert (grüne Platine und grauer Kasten) [12]. Rechts: Blockschaltdiagramm des OMs [14].

Das Precision Optical Calibration Module wurde im März 2017 an einer untenliegenden Detection Unit angebracht und ist dort zwischen dem Central Module und dem nächsten Optical Module befestigt. Im Mai 2017 konnte es daraufhin erstmals erfolgreich in Betrieb genommen werden, das nachfolgende Kapitel wird sich damit eingehender beschäftigen.

4 POCAM - Precision Optical Calibration Module

Die Realisierung des ersten Precision Optical Calibration Modules bildet die Grundlage dieser Bachelorarbeit. Im nachfolgenden Kapitel wird die Entwicklung und der Aufbau des POCAM am Lehrstuhl für Experimental Physics with Cosmic Particles (ECP) begleitet und ein Einblick in dessen wichtigsten Komponenten und Eigenschaften geboten.

Hauptziel der Entwicklung des Precision Optical Calibration Modules ist es die Detektion von Neutrinos in dem Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU) zu verbessern. Zu diesen Zweck soll eine isotrope Lichtquelle innerhalb von PINGU platziert werden um mit gezielten ultrakurzen Aufleuchten der LEDs (Flashes) die optischen Eigenschaften des Eises und die Effizienz sowie Position der DOMs zu bestimmen. Damit kann eine maßgebliche Verbesserung der Energieauflösung und der Detektion von Neutrinos erreicht werden.

4.1 Design und Aufbau

Erste Designkonzepte des POCAM konzentrierten sich auf eine sphärische Realisierung, ähnlich der DOMs in IceCube oder der OMs in GVD. Während der Konzeptphase stand man jedoch vor einigen Herausforderungen, so stellte sich die Frage wie eine isotrope sphärische Abstrahlung mit diesem Design realisiert werden kann und wo die notwendige Elektronik untergebracht werden sollte. Letztere würde für sich genommen schon eine Hemisphäre ausfüllen und somit nur eine Abstrahlung aus der oberen oder unteren Halbkugel ermöglichen.

Im Laufe der Designfindung wurde daher eine zylindrische Lösung in Betracht gezogen. So können die untere und obere Hemisphäre jeweils eigene Lichtpulse generieren. Außerdem ist es möglich die notwendige Elektronik im Zylinder zu verstauen. Eine Übersicht über das aktuelle Design und den Aufbau des POCAM findet man in Abbildung (17).

Die nächsten Teilkapitel konzentrieren sich auf die Vorstellung der einzelnen Komponenten die das Precision Optical Calibration Module beinhaltet. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den elektronischen Elementen und, da sie eine der wichtigsten Eigenschaften darstellt, der Messung der Isotropie.



Abbildung 17: Links: Aufteilung der Komponenten für die PTFE-Sphäre, die kreisrunde Abschirmung mit den beiden Aussparungen für die Lichtsensoren (eine Photodiode und ein Silizium Photomultiplier (SiPM)) verhindert störende Lichteinflüsse bei diesen. Darunterliegend das Analogboard mit den für die Flashes benötigten LED-Schaltungen.

Rechts: Zusammensetzung des POCAMs im Zylinder, obere und untere Hemissphäre ermöglichen jeweils Flashes. In der Mitte des Zylinders kann die benötigte Elektronik eingebaut werden, des Weiteren finden dort auch die Zuleitungen platz [17].

4.2 Analogboard

Auf dem Analogboard befinden sich die Schaltungen für die LED-Flashes und für die In-Situ Messung der Flashes durch eine Photodiode beziehungsweise einen Silizium Photomultiplier (SiPM). Zu sehen sind die Ober- und Unterseite des Analogboards in Abbildung (18), wobei die vorgestellten Komponenten farbig umrandet sind.

Die Schaltungen für die Lichtpulse und die In-Situ Messung werden im Weiteren genauer vorgestellt und es wird Bezug genommen auf die Auswahl der richtigen LEDs. Auf die strom- bzw. spannungsversorgenden Elemente soll hingegen nicht weiter eingegangen werden.



Abbildung 18: Links: Oberseite des Analogboards mit der Photodiode (blau), dem SiPM (orange) und den LEDs für die Lichtpulse.

Rechts: Unterseite des Analogboards mit den grün umrandeten vier Kapustinski Schaltkreisen [21].

4.2.1 Kapustinski Schaltkreis

Zentrales Element für die Flashes ist der, nach dem Erfinder benannte, Kapustinski Schaltkreis. Mit diesem ist es möglich kurze Flashes zu erzeugen, welche über ein Rechtecksignal getriggert werden können. Auf dem Analogboard sind insgesamt vier solcher Schaltkreise verbaut (grüne Markierung in Abbildung (18)), welche sich durch die verwendete LED und die Länge des Lichtpulses unterscheiden. Abschließend folgt eine Erläuterung der Funktionsweise der Schaltung, die aus Abbildung (19) entnommen werden kann.

1) Kein Triggersignal:

Steht an dem Kondensator C_2 kein Rechtecksignal an, so liegt die Schaltung nur an der negativen Gleichspannung V_{cc} . In diesem Fall gilt für den frequenzabhängigen Blindwiderstand des Kondensators X_{C1} nachfolgender Limes.

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1}, \quad \lim_{f \to 0} X_{C1} \to \infty$$
(40)

Daraus folgt, dass die gesamte Spannung an dem geladenen Kondensator C_1 abfällt. An Widerstand R_2 liegt keine Spannung an, dadurch schaltet der Transistor T_1 nicht durch und somit blockiert auch Transistor T_2 . Es findet kein Stromfluss durch die LED statt.



Abbildung 19: Qualitative Schaltung des Kapustinski Lichtpulsers ohne explizite Werte für die Komponenten [13].

2) Triggersignal:

Wird die Schaltung mit einem Rechtecksignal getriggert kann sich der Kondensator C_2 aufladen. Die Schaltung wird nun frequenzabhängig. Dadurch hat der zuvor aufgeladene Kondensator C_1 die Möglichkeit sich zu entladen und der Blindwiderstand sinkt. Damit liegt auch an Widerstand R_2 eine Spannung an und die beiden Transistoren schalten einen kurzen Moment durch und danach sofort wieder ab. Somit ist bei getriggerter Schaltung ein kurzer Stromfluss durch die LED gegeben, ein Flash wird erzeugt. Die Entladung der LED wird bestimmt über die Spule L_1 und entscheidet somit über die Länge der Pulsdauer. Diese kurzzeitige Selbsthaltung ist durch die Größe der Spule justierbar.

4.2.2 Auswahl der Light Emitting Diodes (LEDs)

Für eine sinnvolle Kalibrierung ist es unerlässlich die richtigen Lichtquellen zu verwenden. Die Auswahl der passenden Light Emitting Diode (LED) ist daher Thema dieses Abschnitts. Grundsätzlich sollten die LEDs zwei Eigenschaften erfüllen:

- Die Wellenlänge sollte im Bereich der Cherenkovstahlung liegen, also im bläulichen Bereich (430-490nm).
- Die Gesamtzahl der emittierten Photonen muss möglichst hoch sein, damit der Lichtpuls eine weite Strecke im Medium zurücklegen kann.

Zusätzlich muss die von der LED abhängige Pulsdauer berücksichtigt werden, um kurze und lange Lichtpulse im POCAM generieren zu können. Um die geeigneten LEDs auszuwählen, wurden diese in einer Messreihe getestet. Zu diesem Zweck wurde in einer Dunkelkammer die, im POCAM verwendeten, SiPM und Photodiode bestrahlt und die dazugehörige integrierte Spannung (Amp) und die Zeitdauer bis zu deren Maximum aufgenommen. Für die Berechnung der Anzahl der Photonen pro Raumwinkel betrachtet man zuerst den generellen Ausdruck für die Ladung Q.

$$Q = N_{fired} \cdot e \tag{41}$$

Diese errechnet sich über die Anzahl der ausgelösten Elektronen (N_{fired}) und deren Elementarladung (e). Mit dem vom Oszilloskop aufgenommenen integrierten Signal (Amp) und dem benutzten Koppelwiderstand (R) errechnet sich die Ladung.

$$Q = \int I(t)dt = \int \frac{U(t)}{R} = \frac{1}{R} \underbrace{\int U(t)dt}_{Amp}$$
(42)

Zusätzlich müssen die Verstärkungsfaktoren (G) der Schaltung bis zum Oszilloskop in der Gleichung berücksichtigt werden.

$$N_{fired} = \frac{Amp}{R \cdot G \cdot e} \tag{43}$$

Die Anzahl der einfallenden Photonen kann unter Berücksichtigung der Quanteneffizienz (QE) erfolgen, diese bietet einen sensorabhängigen Umrechnungsfaktor zwischen den einfallenden Photonen und den ausgelösten Elektronen (Strom). Des Weiteren muss der sogenannte Fill Faktor (FF) mit einbezogen werden, dieser setzt die vom Sensor eingenommene Fläche zu der Fläche, welche Effizient für die Registrierung von Events genutzt werden kann in Beziehung. Für den SiPM ist der Fill Factor schon in der Quanteneffizienz beinhaltet und wird Photon Detection Efficiency (PDE) genannt. Durch dies unterscheiden sich die beiden Gleichungen leicht voneinander.

$$N_{Photon,PD} = \frac{Amp}{R \cdot G \cdot e \cdot FF \cdot QE}, \ N_{Photon,SiPM} = \frac{Amp}{R \cdot G \cdot e \cdot PDE}$$
(44)

Um nun die Gesamtzahl der emittierten Photonen zu erhalten, wird die ausgeleuchtete Fläche der LEDs benötigt. Für den Erhalt dieser wird der Abstrahlwinkel der jeweiligen LED (θ) und der Abstand (d) der LED zum Sensor benötigt.

$$A_{tot} = \pi \cdot (d \cdot \sin(\frac{\theta}{2}))^2 \tag{45}$$

Es wird nun eine homogene Intensität über die Fläche A_{tot} angenommen und berechnet wie oft die Fläche des SiPM in A_{tot} übertragen werden kann. Die Annahme der Homogenität erleichtert die Berechnung ungemein, ist für die meisten Leuchtmittel aber nicht korrekt, da die Intensität an den Rändern abnimmt. Nichtsdestotrotz bietet diese Berechnung eine erste Abschätzung der Photonanzahl relativ zu den verwendeten LEDs.

				θ [°]	$\tau[ns]$	Relative	
LED	$\lambda \; [m nm]$					Intensität	
	min	typ	max			(PD)	(SiPM)
CLM1B-BKW-CTBUB453	465	470	475	120	10	0.17	0.41
SMLZN4BGTT86A	464	470	476	120	9	0.12	0.28
ALMD-CB3D-SU002	460	470	480	60	14.5	0.85	0.92
XPEBBL-L1-0000-00201	465	475	485	135	10.7	0.46	0.62
XQABLU-0000-000000U01	450	457.5	465	105	15.6	0.39	0.69
LXZ1-PB01	460	470	480	125	10	0.19	0.35
APTR3216QBC/D	450	460	470	140	9.2	0.04	0.06
LXZ1-PR01	440	447.5	460	125	7.5	0.04	0.06
LZ1-00B200	450	455	460	80	8.2	1.00	1.00

$$N_{tot} = \frac{N_{Photon,Sensor}}{A_{Sensor}} \cdot A_{tot} \tag{46}$$

Tabelle 2: Messwerte der LEDs bei einer kurzer Pulsdauer des Kapustinskis.

Tabelle (2) bietet eine Übersicht über die verwendeten LEDs, deren abgedeckten Wellenlängen (λ), des Abstrahlwinkels (θ), der aufgenommen Pulsdauer (τ) und

der relativen Gesamtintensität in Bezug auf die LED mit der größten geschätzten Photonenanzahl, stellvertretend für einen Kapustinski mit kurzer Pulsdauer. Die Messungen für den Kapustinski mit lang eingestellter Pulsdauer verliefen analog und brachte die gleiche Auswahl an LEDs hervor. Die grünen LEDs wurden als Pendant aus der gleichen Produktreihe zu den blauen LEDs der Hersteller gewählt, um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Wellenlängen zu erzielen.

Die Wahl fiel auf die grau hinterlegten LEDs. Auf dem Analogboard des ersten PO-CAM wurden schlussendlich zwei Kapustinski Schaltkreise mit einer kurzen und zwei mit einer längeren Pulsdauer mit entsprechender blauer bzw. grüner LED und zwei weitere LEDs, welche direkt per Befehl vom FPGA angesprochen werden können, realisiert.

4.2.3 SiPM und Photodiode

Um eine In-Situ Messung des emittierten Lichts zu ermöglichen wurden auf dem Analogboard eine Photodiode (PD) und ein Silizium Photomultiplier (SiPM) verbaut. Beide ermöglichen die Registrierung von Flashes und sollen im Folgenden näher vorgestellt werden.

Photodiode:

Eine Photodiode mit p-n Übergang bildet, wenn sie in Sperrrichtung betrieben wird, ein elektrisches Feld in der Nähe des Übergangs aus. Dieses Feld hält die Elektronen im n-dotierten und die Löcher im p-dotierten Bereich. Sobald ein Photon mit einer ausreichenden Energie (für Silizium mehr als 1.1eV) im elektrischen Feld absorbiert wird, entsteht ein Elektron-Loch-Paar. Unter dem Einfluss des elektrischen Feldes, driftet das Elektron zur n-dotierten und das Loch zur p-dotierten Fläche. Dies resultiert in einen Stromfluss im angrenzenden Schaltkreis. Ein Elektron-Loch-Paar kann auch thermisch generiert werden, was sich als sogenannter Darkstrom, da dieser auch ohne Lichteinfall entstehen kann, bemerkbar macht [25].

Die im POCAM verwendete Photodiode ist eine PD-PS33-6b von First Sensor mit einer Bestrahlungsfläche von 33mm² in einem TO8 Gehäuse mit einer Quanteneffizienz von fast 90% im blauen bis grünen Wellenlängenbereich. Die PD ist in Abbildung (18) blau umrandet sichtbar.

SiPM:

Die prinzipielle Funktionsweise des SiPM gleicht der Photodiode, so wird auch hier mittels Lichteinstrahlung ein Stromfluss angeregt. Der SiPM ist in seinem Aufbau jedoch eine Parallelschaltung von mehreren Avalanche-Photodiodes (APDs) im Geiger-Modus in einem Array. APDs können mit hohen elektrischen Feldern betrieben werden. Dadurch kann ein Elektron oder entsprechend ein Loch so stark im Feld beschleunigt werden, dass es mit dem Kristallgitter kollidieren kann und aufrecht erhalten werden [25].

dort weitere Elektronen-Loch-Paare entstehen. Diese können wiederum weitere Paare auslösen, eine Lawine (Avalanche) von Ladungsträgern entsteht. Liegt die Sperrspannung unterhalb der Durchbruchspannung der Diode, so verlassen mehr Elektronen bzw. Löcher den Halbleiter als entstehen. Die Anzahl der Ladungsträger nimmt ab. Im Geiger Modus werden die Photodioden mit einer Sperrspannung oberhalb

Eine Photodiode und ein Widerstand formen eine Mikrozelle des SiPM. Die Größe einer Mikrozelle ist abhängig von dem verwendeten SiPM. Der verbaute SiPM von Ketek PM3325NS-SB0 hat eine Größe von $9mm^2$ und eine Mikrozellengröße von $25\mu m$, womit 13408 Mikrozellen auf dem SiPM lokalisiert sind [36].

der Durchbruchspannung betrieben, dadurch kann die Lawine der Ladungsträger



Abbildung 20: Beschaltung des SiPM: Nach den Filtern wird das Signal im Cremat invertiert und verstärkt. Danach wird es mit einem Offset versehen und nochmal verstärkt.

Die Beschaltung der beiden Sensoren auf dem Analogboard unterscheidet sich nur in den Widerstandsgrößen und den Kapazitäten voneinander. Die beiden Schaltungen sind Abbildung (20) und (21) zu entnehmen.

Nachdem die Photodiode bzw. der SiPM ein Signal detektiert haben und ausgeben, wird dies nach einem nachgeschalteten Filter an einen Cremat weitergegeben. Diese elektronische Bauteil bietet eine interne Beschaltung mit einen integrierenden Operationsverstärker und einen nachgeschalteten weiteren Operationsverstärker, zu sehen in Abbildung (22). Der Integrator des Cremat versucht seine Ausgangsspannung der Eingangsspannung anzugleichen, diesem Prinzip liegen alle Operationsverstärker den Kondensator C_f auf, bis die maximale Ausgangsspannung erreicht ist. Wechselt die Eingangsspannung ihre Polarität, entlädt sich der Kondensator wieder langsam. (Cremat CR-11)

STD-



and the second

Abbildung 21: Beschaltung des SiPM: Nach den Filtern wird das Signal im Cremat invertiert und verstärkt. Danach wird es mit einem Offset versehen und nochmal verstärkt.



Abbildung 22: Interne Beschaltung des Cremat, nach dem Integrator folgt noch ein weiterer Verstärker. Die Verstärkungsfaktoren für den Typ des CR-110 sind hier noch eingetragen [16].

Somit kann der einzelne Peak der Sensoren in ein langes Signal umgewandelt werden, mehrere dieser integrierten Signale sind in Abbildung (23) dargestellt. Die Sensoren verwenden unterschiedliche Cremat Typen, welche sich hauptsächlich durch deren Verstärkungsfaktor unterscheiden. So bietet der Typ CR-113 für den SiPM einen Faktor von $1.3 \frac{\text{mV}}{\text{pC}}$ und der Typ CR-110 der Photodiode eine Verstärkung von $1.4 \frac{\text{V}}{\text{pC}}$.

Nach der Signalverarbeitung durch den Cremat wird das Signal im weiteren Verlauf, durch einen an 9V angeschlossenen Spannungsteiler, mit einem Offset angehoben. Die Berechnung des Offsets und damit einhergehend der Eingangsspannung U_e an dem nachfolgenden letzten Verstärker ist in nachfolgender Gleichung, jeweils für den SiPM und die PD festgehalten, die Spannung U gibt dabei die Größe des Signals nach dem Cremat an.

₽å

GND1

₽



Abbildung 23: Integriertes Signal der LEDs, diesen Daten stammen bereits aus dem POCAM in GVD Baikal. LED 1 ist die blaue LED des Kapustinskis mit kurzer Pulsdauer, LED 2 ist die blaue LED des Kapustinskis mit langer Pulsdauer und LED 3 ist eine vom FPGA angesteuerte LED mit einer Pulsdauer von 40ns. All LEDs zusammen ergeben sich aus den gerade erwähnten LEDs und der LED des FPGAs bei einer Pulsdauer von 10ns [7].

Samples at 10MHz

Offset SiPM:

$$U_{e,SiPM} = \frac{R_9}{R_{26} + R_9} \cdot (9V - U) + U \approx \frac{1}{200} \cdot 9V + \frac{199}{200} \cdot U \tag{47}$$

Offset Photodiode:

$$U_{e,PD} = \frac{R_{30}}{R_{31} + R_{30}} \cdot (9V - U) + U \approx \frac{1}{55} \cdot 9V + \frac{54}{55} \cdot U$$
(48)

Die Anhebung des Offsets bildet den vorletzten Schritt vor der Weitergabe des Signals. Am Schluss wird das bearbeitete Signal nochmals mittels eines nichtinvertierenden Operationsverstärkers verstärkt. Während des gesamten Optimierungsprozesses und den Testläufen im Labor war es nötig sowohl den Offset als auch die Verstärkung anzupassen, um einer Sättigung bei einem Flash von allen LEDs bzw. das Verschwinden des Signals bei der schwächsten LED entgegenzuwirken. Die aktuellen Werte finden sich in obigen Gleichungen zum Offset und in Nachstehenden zur Verstärkung. Die Weitergabe des vollständig bearbeiteten Signals findet über das Digitalboard statt, welches im nachfolgenden Kapitel behandelt wird.

Verstärkung SiPM:

$$U_{a,SiPM} = \left(1 + \frac{R_{45}}{R_{46}}\right) \cdot U_{e,SiPM} \approx 7 \cdot U_{e,SiPM} \tag{49}$$

Verstärkung Photodiode:

$$U_{a,PD} = (1 + \frac{R_{47}}{R_{48}}) \cdot U_{e,PD} \approx 12.8 \cdot U_{e,PD}$$
(50)

4.3 Digitalboard

Im Inneren des POCAM finden zwei Digitalboards Platz, welche entweder den Master oder Slave Part übernehmen und somit je ein Analogboard ansteuern können. Die vier Hauptaufgaben des Digitalboards sind:

- Kommunikation nach außen
- Datenerfassung und -speicherung
- Sensorik
- Update Handling

Die Kommunikation mit dem Digitalboard findet über ein TCP/IP Netzwerkprotokoll, welches von GVD Baikal verwendet wird, statt. Die Weiterleitung zum POCAM erfolgt über einen Ethernet/Serial Converter von Moxa, der die Datenübertragung auf eine RS485 Schnittstelle umlegt. Diese kann die Kommunikation über weite Strecken und somit bis hin zum Digitalboard übernehmen.

Die Kommunikation auf dem Master- bzw. Slaveboard selbst findet immer über die darauf verbauten Mikrocontroller statt. Dieser kann, die entsprechenden Befehle vorausgesetzt, die Sensoren für die Messung von Temperatur und Feuchtigkeit auslesen und die aufgenommenen Werte zurück zum Rechner leiten. Darüber hinaus spricht der Mikrocontroller das Field Programmable Gate Array (FPGA) an, dieser besitzt eine konfigurierbare Logikgatteranordnung und steuert in der gewählten Konfiguration die Analog/Digital- (ADC) bzw. Digital/Analog-Converter (DAC) an.

Mittels der vier DAC auf dem FPGA können zwei LEDs bipolar angesprochen und somit Flashes generiert werden. Die vier Kapustinski-Schaltkreise werden mit Low



Abbildung 24: Oberseite des Digitalboards mit Mikrocontroller (blau), FPGA (grün) und weiteren Elementen. Eine SD-Karte (orange) ermöglicht das Speichern der Firmware [21].

Voltage Complementary Metal Oxide Semiconductor (LVCMOS) Leitungen getriggert. Das Auslesen des SiPM und der Photodiode funktioniert analog über zwei ADC, welche die analogen Signale der Sensoren in digitale umwandeln. Die ausgelesenen Daten werden auf einen First-In-First-Out (FIFO) Speicher, welcher im FPGA integriert ist, gespeichert und können wiederum vom Mikrocontroller geladen und weitergeleitet werden. Da beide FPGA eine identische Clockfrequenz und Firmware haben und die Zuleitungen vom Mikrocontroller gleichlang sind, können beide gleichzeitig und daher ohne Delay einen Flash erzeugen. Dadurch ist es möglich die beiden Hemisphären zur selben Zeit zu flashen [20].

Eine schematische Darstellung des Kommunikationsablaufs kann man Abbildung $\left(25\right)$ entnehmen.

Ein weiterer Nutzen des Digitalboards bietet sich bei einem Update der Firmware. Ein spezieller Speicher auf dem Board ermöglicht die Zwischenspeicherung der aktuellen Firmware. Sollte es aus verschiedenen Gründen zu einem Abbruch beim Update kommen und dadurch nur unvollständige Software aufgespielt werden, würde dies gegebenenfalls zu signifikanten Schäden bis hin zum kompletten Kommunikationsverlust führen.



Abbildung 25: Schematischer Ablauf des Kommunikationsprozesses über das Digitalboard. Der First-In-First-Out Speicher ist im FPGA integriert, wurde in dieser Darstellung aber zur Übersichtlichkeit separat eingezeichnet.

Mit dem Zwischenspeicher kann, falls es nötig sein sollte, immer noch ein Backup erfolgen und somit die Kommunikation wiederhergestellt werden [20].

Das Digitalboard wurde vom Zentralen Technologie Labor (ZTL) in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Experimental Physics with Cosmic Particels (ECP) konzipiert und entwickelt [20].

4.4 Messung der Isotropie

Eine der wichtigsten Komponenten des POCAM ist die integrierende Sphäre, die es ermöglicht eine von den LED Abstrahlwinkeln unabhängige isotrope Lichtquelle zu realisieren. Als geeignetestes Material stellte sich, in Anbetracht der optischen und mechanischen Eigenschaften, Polytetrafluorethylen (PTFE) heraus.

Mittels eines speziellen Fräsverfahrens konnten die benötigten Sphären aus einem Stück gefertigt werden, da das Innere des Werkstücks mit einem schwenkbaren Fräskopf ausgehöhlt werden konnte. Damit war es möglich Probleme bei der optischen Brechung zu umgehen, die an den Grenzflächen zwischen zwei zusammengefügten Hemisphären entstehen würden. Die im POCAM verwendeten Sphären wurden alle mit einer Materialdicke von 0.5mm gefertigt und haben einen Außendurchmesser von 48mm.

Die integrierende Sphäre ist, wie schon erwähnt, aus Polytetrafluorethylen gefertigt. Dieses Material eignet sich als ein sogenannter Lambert'scher Strahler, welcher einfallendes Licht diffus in alle Richtungen reflektiert. Allerdings gibt es kein Material, welches diesen Aspekt vollständig erfüllt, dennoch kann mithilfe der sphärischen Symmetrie und den Eigenschaften von PTFE, die gleiche Abstrahlcharakteristik in Anbetracht von Intensität und Winkelverteilung über die Sphäre realisiert werden. Dies ermöglicht eine isotrope Verteilung des Lichts [8].

Der Grad der Reflektivität von PTFE steigt mit zunehmender Materialdicke, für die Anwendung im POCAM erwies sich, in vorhergehenden Untersuchungen, eine Schichtdicke von 0.5mm als optimal.

Um die isotrope Verteilung des Lichts weiter zu verbessern, wurde es in Betracht gezogen, einen PTFE-Stöpsel in die Öffnung der Sphäre zu integrieren. Dieser Verteilt das Licht der LEDs diffus in das Innere der Sphäre von dort es weiter isotrop im Raum verteilt werden kann. Ziel ist dabei eine homogene Verteilung des Lichts schon innerhalb der Sphäre zu erzielen, um eine punktuelle höhere Konzentration der Intensität auf der Innenfläche der Sphäre zu vermeiden. Eine erhöhte Konzentration der Intensität würde einen sichtbaren Effekt auf die Isotropie haben, da an dieser Stelle mehr Photonen transmittiert werden als an Stellen mit geringerer Intensität.

Ein schwarzes Cover um den Hals der Sphäre verhindert zusätzlich, dass Licht an der Seite des Halses austritt. Der gesamte Lichtstrahl soll in die Sphäre geleitet werden. Zu sehen ist dieses schwarze Cover, die Sphäre selbst und der Plug auf Abbildung (17), die den auseinandergezogenen Aufbau zeigt.

Für die Verifikation der obigen Annahmen boten sich mehrere Messreihen für die Isotropie an. Diese wurden in der Dunkelkammer mithilfe eines festinstallierten SiPM und einer, mittels eines von einem Arduino gesteuerten Schwenkarmes, um 360° drehbaren und von einer LED ausgeleuchteten Sphäre durchgeführt. In Anbetracht



Abbildung 26: Versuchsaufbau der Isotropiemessung. Die Apparatur lässt sich 360°, um die eingezeichnete Achse (weiß) drehen. Die Position der Sphäre wurde im Weiteren nach rechts verschoben, um eine Linie mit der Drehachse zu bilden. Auf dem Bild ist die alte Sphäre zu sehen, die Naht zwischen den beiden Hemissphären ist noch schwach zu erkennen. Alle Elemente, die einen störenden Einfluss auf die Messung durch eigene Lichterzeugung nehmen, wurden vor der Versuchsdurchführung aus der Dunkelkammer entfernt.

des zylindrischen POCAM, liegt der Hauptaugenmerk auf den Messwerten von 0° bis $180^\circ.$

Zunächst wurden zwei Messungen mit beziehungsweise ohne Plug und zwei verschiedenen LEDs durchgeführt. Der Plug hatte dabei eine Stärke von 0.5mm. Die verwendeten LEDs sind eine LXZ1-PR01 SMD LED mit einem Abstrahlwinkel von 125° und eine ALMD-CB3D-SU002 mit einem Abstrahlwinkel von 60°. Die aufgenommenen Graphen finden sich in Abbildung (27) wieder.

Gut sichtbar ist dabei die Abhängigkeit der Isotropie von der verwendeten LED bei einer Sphäre ohne Plug. Für eine LED mit großen Abstrahlwinkel ist die Isotropie sogar besser als mit eingesetzten Plug. Bei einem kleinen Öffnungswinkel sieht man aber die Verschlechterung hingegen sehr gut. Abschließend kann man sagen, dass durch die Verwendung eines Plugs die Isotropie unabhängiger von der verwendeten LED wird.



Abbildung 27: Links: Vergleich der Isotropie ohne Plug mit zwei LEDs mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln. Rechts: Vergleich der Isotropie mit Plug zwischen den selben LEDs.

Im Weiteren konnte eine Verbesserung der Isotropie mit den an der TU München im Fräsverfahren hergestellten Sphären gegenüber Sphären aus zwei zusammengeklebten Halbkugeln festgestellt werden. Letztere wurden zunächst für die ersten Testläufe verwendet. In Abbildung (28) sieht man die Gegenüberstellung der zwei unterschiedlichen Sphären.



Abbildung 28: Vergleich der Isotropie der alten Sphäre (rot), welche aus zwei Halbkugeln zusammengeklebt wurde, mit der gefrästen Sphäre der TU München (blau).

Zu guter Letzt sollte noch in Betracht gezogen werden, welchen Plugstärke sich für die Anwendung eignet. Die bisherigen Messungen bezogen sich alle auf eine Stärke von 0.5mm. Eine dickere Plugwand verringert die Transmission der Photonen, erhöht in der Theorie aber die diffuse Verteilung des Lichtes in die Sphäre und könnte somit zu einer besseren Isotropie führen, wenngleich darunter auch die Lichtmenge zu leiden hätte. Dadurch ist es wichtig eine Balance zwischen den isotropen Eigenschaften und der ausgeschöpften Lichtmenge zu finden. Untersucht wurde dafür die relative Intensität bei einer Halbdrehung um die Sphäre mit drei verschieden Plugs der Stärken 0.5mm, 1mm und 2mm.

Da sich die Isotropie innerhalb der drei verschiedenen Plugs nicht signifikant ändert, wurde der Plug mit der höchsten Transmissivität im POCAM verwendet. Zu sehen sind die Messwerte in Abbildung (29).



Abbildung 29: Vergleich zwischen den Plugs mit einer Dicke von 0.5, 1 und 2mm. Der Unterschied ist nicht gravierend, daher wurden 0.5mm Plugs verwendet, um das meiste Licht zu erhalten.

Nach den ersten vielversprechenden Probeläufen des Precision Optical Calibration Modules im Labor konnte es im März 2017 seinen Dienst im Gigaton Volume Detector Neutrino Teleskop im Baikalsee antreten.



Abbildung 30: Die beiden M. Sc. Studenten Felix Hennigsen und Kilian Holzapfel (v. l.) bei der Installation des POCAM an den neuen String des GVD im Baikalsee.

Der Zusammenbau des POCAM erfolgte im Reinraum um etwaigen Verschmutzungen an der integrierenden Sphäre oder der schützenden Hemisphäre aus Glas vorzubeugen. Nachdem die benötigte Elektronik in Form der beiden Digitalboards im Inneren des Zylinders verstaut war, konnten auch die beiden Glashemisphären mit den schon eingebauten Analogboards, integrierenden Sphären und den Abschirmungen für die Sensoren an den Zylindermantel geschraubt werden.

Die äußere Hülle des POCAM wurde zuvor noch Druck- und Dichtetests unterzogen. Dies sollte sicherstellen, dass beim Einlass in den See kein Wasser in das Gehäuse eindringen kann und dort die Elektronik beschädigt. Darüber hinaus sollte das Vakuum im Inneren des POCAM stabil bleiben, um der Ansammlung von Kondenswasser auf den Hemisphären vorzubeugen.

Weitere Testläufe des vollständig zusammengebauten POCAM im Labor verliefen vielversprechend. Die beiden M. Sc. Studenten des Lehrstuhls Experimental Physics with Cosmic Particles (ECP) von Professorin Elisa Resconi, Felix Henningsen und Kilian Holzapfel konnte ihre Reise mit dem ersten POCAM zum Baikalsee antreten.

Dort wurde er als Teil einer Detection Unit an einem neu eingelassenen String

angebracht. Hierbei liegt er zwischen dem untenliegenden Central Modul und den darüberliegenden sechs Optical Modules. Die Position ist in Abbildung (31) rot markiert, Abbildung (30) und (32) bieten einen Einblick in das Einlassen des Moduls in den See.



Abbildung 31: Position des POCAM (roter Zylinder) innerhalb des Strings in GVD Baikal [12].

Die erste Kommunikation mit dem Modul und damit auch das erste Flashen der LEDs konnte jedoch erst im Mai 2017 erfolgen, da die russischen Physiker ihren Aufbau zuvor noch abschließen mussten. Die Tests des POCAM im Baikalsee verliefen gut, die Aufnahmen der LED-Flashes im Labor durch den SiPM und die Photodiode konnten reproduziert werden.

Auch das charakteristische Spektrum der Flashes konnte kürzlich in den Aufnahmen der Optical Modules von GVD ausgelesen werden und hat damit den Einsatz des POCAM im Baikalsee besonders erfolgreich abgeschlossen.

Das erste Precision Optical Calibration Module konnte erfolgreich realisiert und im Baikalsee im Rahmen des Gigaton Volume Detectors zum Einsatz gebracht werden. Für die weitere Konzeption und die stetige Weiterentwicklung des POCAM ist dies ein wichtiger Meilenstein.

Trotz der vielen erfolgreichen Aspekte müssen noch weitere Tests für die Optimierung erfolgen. So haben die Photodioden des POCAM bei Testläufen innerhalb und außerhalb des Sees eine Frequenzüberlagerung über ihren eigentlichen Signal. Der Ursprung dessen muss noch herausgefunden werden, so könnte eventuell die Wechselspannungsversorgung innerhalb des POCAM zu diesen parasitären Überlagerungen führen. In diesem Fall könnte gegebenenfalls ein ausgelagertes Netzteil Abhilfe verschaffen. Zunächst muss aber der genaue Ursprung des Fehlers noch in weiteren Testläufen herausgefunden werden.



Abbildung 32: Letzter Blick auf das POCAM, bevor er in das Wasser des Baikalsees eingelassen wird.

Des Weiteren muss die Hitzeentwicklung innerhalb des POCAM beachtet werden, einige der Leistungsverstärker erhitzen das Digitalboard. Durch eine kleine Änderung im Schaltplan des Digitalboards konnte dieses Problem aber bereits gelöst werden.

Zur Zeit läuft die Planung eines weiteren Experiments im Pazifischen Ozean in der Nähe von Vancouver. Dort soll ein ganzer String mit POCAMs und eigens, vom Lehrstuhl für Experimental Physics with Cosmic Particels, dafür entwickelten optischen Modulen bestückt werden. Die Weiterentwicklung bis hin zum Einsatz in PINGU wird also stetig fortgesetzt.

Literatur

- Bogdan Povh et al. Teilchen und Kerne. 9. Aufl. Springer Spektrum, 2014. ISBN: 978-3-642-37822-5.
- [2] K. Kodama et al. A first measurement of the interaction cross section of the tau neutrino. arXiv: 0711.0728. The DONuT Collaboration, S. 2, 3.
- Katja Bammel et al. Tscherenkow-Strahlung. Aufgerufen am 21.05.2017. 1998.
 URL: http://www.spektrum.de/lexikon/physik/tscherenkow-strahlung/ 14796.
- [4] M. G. Aartsen et al. The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems. arXiv: 1612.05093v2. The IceCube Collaboration, 2017.
- [5] O. V. Suvorova et al. Baikal-GVD: first cluster Dubna. arXiv: 1511.02324. Institute for Nuclear Research et al., 2015.
- [6] R. Abbasi et al. Calibration and Characterization of the IceCube Photomultiplier Tube. arXiv: 1002.2442v1. The IceCube Collaboration, 2010.
- [7] Allgemeine Erklärungen zu den Eigenschaften der POCAM Komponenten. Mit freundlicher Unterstützung von Kilian Holzapfel.
- [8] Allgemeine Erklärungen zu den Eigenschaften der POCAM Komponenten. Mit freundlicher Unterstützung von Felix Henningsen.
- [9] Allgemeine Erklärungen zu den Eigenschaften der POCAM Komponenten. Mit freundlicher Unterstützung von Antonio Esteban.
- [10] Allgemeine Erklärungen zu den Eigenschaften der POCAM Komponenten. Mit freundlicher Unterstützung von Andreas Gärtner.
- [11] A. D. Avrorin. Baikal-GVD. EPJ Web of Conferences. Aufgerufen am 30.05.2017.
 2017. URL: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2017/05/ epjconf_ricap2017_04007.pdf.
- [12] A. D. Avrorin. STATUS AND RECENT RESULTS OF THE BAIKAL-GVD PROJECT. Aufgerufen am 30.05.2017. 2017. URL: http://www1.jinr.ru/ Pepan/v-46-2/15_avr.pdf.
- [13] Y. E. Vyatchin B. K. Lubsandorzhiev. *Studies of Kapustinskys light pulser timing characteristics.* arXiv: 0410281. Institute for Nuclear Research RAS.
- [14] Baikal-GVD Gigaton Volume Detector in Lake Baikal (Scientific-Technical Report). Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences et al., 2012.
- Beyond IceCube. Aufgerufen am 23.05.2017. URL: https://icecube.wisc.edu/ science/beyond.
- [16] CR-110 charge sensitive preamplifier: application guide. Aufgerufen am 09.06.2017.
 2014. URL: http://www.cremat.com/CR-110.pdf.

- [17] Darstellung des Aufbaus des POCAM. Mit freundlicher Genehmigung und Erläuterungen von Kilian Holzapfel.
- [18] Die vier fundamentalen Wechselwirkungen. Aufgerufen am 14.06.2017. URL: http://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/die-vier-fundamentalen-wechselwirkungen.
- [19] Grigory Domogatsky. A new neutrino telescope for Lake Baikal. Aufgerufen am 30.05.2017. 2015. URL: https://home.cern/scientists/updates/2015/08/ new-neutrino-telescope-lake-baikal.
- [20] *Erklärung des Digitalboardes*. Mit freundlicher Genehmigung und weiteren Erläuterungen von Michael Böhmer.
- [21] Fotografien des Analog- und Digitalboardes. Mit freundlicher Genehmigung und Erläuterungen von Felix Henningsen.
- [22] Michael Fowler. *Transforming Energy into Mass: Particle Creation*. University of Virginia.
- [23] Claudia Hoehne. *Grundlagen der Cherenkov Strahlung*. Aufgerufen am 21.05.2017. 2008. URL: https://cbm-wiki.gsi.de/foswiki/bin/view/Public/CherenkovStrahlung.
- [24] Philipp Hummel. *Physiknobelpreis für den Nachweis der Neutrinomasse*. Aufgerufen am 16.05.2017. URL: http://www.spektrum.de/news/physiknobelpreisfuer-den-nachweis-der-neutrinomasse/1369644.
- [25] Lincoln Laboratory Journal. Geiger-Mode Avalanche Photodiodes for Three Dimensional Imaging. Bd. 13. Nr. 2. 2002.
- [26] Hermann Kolanoski. Einführung in die Astroteilchenphysik. Aufgerufen am 21.05.2017. 2009, 2010. URL: https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/ astro0910/skripte/cosmics02.pdf.
- [27] Brookhaven National Laboratory. *Discovery of the Muon-Neutrino*. Aufgerufen am 07.05.2017. URL: https://www.bnl.gov/bnlweb/history/nobel/ nobel_88.asp.
- [28] Fermi National Accelerator Laboratory. *Detecting a Tau Neutrino*. Aufgerufen am 11.05.2017. URL: http://www.fnal.gov/pub/inquiring/physics/neutrino/discovery/tau_signal.html.
- [29] Fermi National Accelerator Laboratory. DONUT Details: Creating a Tau Neutrino Beam. Aufgerufen am 11.05.2017. URL: http://www.fnal.gov/pub/ inquiring/physics/neutrino/discovery/neutrino_beam.html.
- [30] Neutrino. Aufgerufen am 15.05.2017. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/ Neutrino#/media/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg.
- [31] Wolfgang Pauli. Fünf Arbeiten zum Abschliessungsprinzip und zum Neutrino. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1977. ISBN: 3-534-06733-9.
- [32] Thomas K. Gaisser. Ralph Engel. Elisa Resconi. Cosmic Rays and Particle Physics. 2. Aufl. Cambridge University Press, 2016. ISBN: 978-0-521-01646-9.

- [33] Brigitte Röthlein. Neutrinos Particles That Fly Sraight [sic!] through Matter. Faszination Forschung. 2015.
- [34] Norbert Schmitz. *Neutrinophysik*. Teubner Studienbücher, 1997. ISBN: 3-519-03236-8.
- [35] Los Alamos Science. The Reines-Cowans Experiments Detecting the Poltergeist. Nr. 25. 1997.
- [36] SiPM WORKING PRINCIPLE. Aufgerufen am 04.06.2017. URL: https:// www.ketek.net/sipm/technology/working-principle/.
- [37] Christine Sutton. *Ghosts in the machine*. Cern Courier. Aufgerufen am 07.05.2017. URL: http://cerncourier.com/cws/article/cern/65501.

Abkürzungsverzeichnis

POCAM Precision Optical Calibration Module I
PINGU Precision IceCube Next Generation UpgradeI
GVD Gigaton Volume DetectorI
AGS Alternating Gradient Synchrotron
DONUT Direct Observation of Nu Tau
CC Charged Current7
NC Neutral Current
PKMS Matrix Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata Matrix
PMT Photomultiplier Tube18
DOM Digital Optical Module19
AGN Active Galatic Nucleus
SNR Supernova Remnant
GRB Gamma Ray Bursts
OM Optical Module
CU Central Module
DU Detection Unit

ADC Analog/Digital-Converter
FPGA Field Programmable Gate Array
DAQ Data Acquisition Center
ECP Experimental Physics with Cosmic Particles
SiPM Silizium Photomultiplier
LED Light Emitting Diode
APD Avalanche-Photodiode
DAC Digital/Analog-Converter
LVCMOS Low Voltage Complementary Metal Oxide Semiconductor
FIFO First-In-First-Out
ZTL Zentralen Technologie Labor
PTFE Polytetrafluorethylen

Abbildungsverzeichnis

1	Gemessenes Spektrum der Betazerfälle	2
2	Experiment zum Nachweis des Elektronneutrinos	4
3	Erzeugung des Neutrinostrahls im DON uT Experiment $\ \ .\ .\ .$.	6
4	Nachweis der Tau-Neutrinos in Detektionskammer $\ . \ . \ . \ .$.	7
5	Standardmodell der Teilchenphysik	9
6	Neutrinooszillationskurve	12
7	Neutrino-Massenhierarchie	13
8	Cherenkoveffekt	17
9	Entstehung von elektromagnetischen Wellen	18
10	Schematische Abbildung Icecube	20
11	IceCube Laboratorium	22
12	IceCube Generation 2 Upgrade	23
13	Aufbau und Funktionsschaltbild eines Digital Optical Module $\ . \ . \ .$	24
14	Verbindung der DOMs im Eis	25
15	Darstellung Baikal GVD und des ersten Clusters Dubna $\ .\ .\ .$.	27
16	Optical Module des Gigaton Volume Detectors	28
17	Zusammensetzung des POCAM	30
18	Analogboard	31
19	Kapustinski Schaltkreis	32
20	Beschaltung des SiPM	36
21	Beschaltung der Photodiode	37
22	Interne Beschaltung des Cremat	37
23	Integriertes Signal der LEDs	38
24	Fotografie des Digitalboards	40
25	Funktionsablauf Digitalboard	41
26	Versuchsaufbau Isotropiemessung	43
27	Vergleich der Isotropie mit und ohne Plug	44
28	Vergleich alte und neue Sphäre	44

29	Vergleich der drei verschiedenen Plugstärken	45
30	Deployment des POCAM in Baikal	46
31	Position des POCAM in GVD	47
32	POCAM über der Eisbohrung in Baikal	48

Tabellenverzeichnis

1	Eigenschaften der	Wechselwirkungen	im Standardmodell.	 8
				~

2 $\,$ Messwerte der LEDs bei einer kurzer Pulsdauer des Kapustinskis. . . $\,$ 34 $\,$

DANKSAGUNG

BACHELOR OF SCIENCE

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen und ein herzliches Danke an alle Personen richten, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein erster Dank geht an die Forschungsgruppe des Experimental Physics with Cosmic Particles (ECP) Lehrstuhls und dabei insbesondere an Professorin Elisa Resconi, die mit Ihrer heiteren Art und einer gelungenen Mischung aus Freiheit und Fokus eine sehr angenehme Arbeitsatmosphäre schafft. Des Weiteren bei Michael Böhmer, Laszlo Papp und Roman Gernhäuser, die stets mit fachmännischen Rat und Tat zur Seite standen und damit das Precision Optical Calibration Module erst ermöglicht haben. Außerdem natürlich bei Antonio, Andreas, Felix und Kilian, an die ich mich immer wenden konnte sobald es eine Frage gab und die mir stets weiterhalfen.

Im Weiteren meinen Eltern Helga und Hermann Spannfellner, die mich während des Studiums stets unterstützen. Außerdem meinen engen Freunden zu Hause und hier in München, mit denen es immer möglich war eine Auszeit vom Studium zu nehmen. Ein besonderer Dank gilt hierbei Ulrich und Philipp, die seit dem Kindergarten an meiner Seite stehen.

Abschließend meiner großartigen Freundin Vera, die mich mit Ihrer wunderbaren Art durch alle Lebenslagen begleitet und mich immer unterstützt.

Vielen Dank!

Christian Spannfellner