



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

BACHELOR ARBEIT

**Realisierung des „Precision Optical Calibration
Module“-Prototyps zur Kalibrierung von
IceCube-Gen2**

**Realization of the „Precision Optical Calibration Module“ Prototype for
Calibration of IceCube-Gen2**

von

FELIX HENNINGSSEN

Mat.Nr.: 03638473

Supervisor:
Prof. E. Resconi

Zweitkorrektur:
Prof. L. Fabbietti

5. Juli 2016

**Realisierung des „Precision Optical Calibration Module“-Prototyps zur
Kalibrierung von IceCube-Gen2**

Abstract

von Felix HENNINGSEN

Die großen Neutrino-Detektoren IceCube-Gen2 und PINGU sollen in Zukunft das Verständnis der Neutrino-Physik weiter vorantreiben und einen tieferen Blick ins Universum ermöglichen. Um dies jedoch umzusetzen, ist eine genaue Kalibrierung der Detektoren von entscheidender Bedeutung. Mit dem Precision Optical Calibration Module, kurz POCAM, sollen die Upgrades des IceCube-Detektors „Gen2“ und „PINGU“ für niedrige Energien, mit noch höherer Statistik, kalibriert werden. Der POCAM soll einen isotropen, genau bekannten Lichtflash im Inneren von IceCube aussenden um eine Detektion nachzuahmen und damit die Detektoren sensibler einzustellen. Mit der weiteren Untersuchung der kürzlich entdeckten Neutrino-Oszillation erhofft man sich vor allem die Bestimmung der Neutrino-Massen-Hierarchie. Die Entwicklung des POCAM schreitet stetig voran und der erste Prototyp soll realisiert werden. Das Ziel dieser Arbeit soll dessen Umsetzung sein. Anfangs wird dabei auf die Grundzüge der Neutrino-Physik eingegangen. Hierzu wird historisch in die Neutrino-Physik eingeleitet und das Standardmodell sowie die Flavor betrachtet. Anschließend soll die Neutrino-Oszillation im Vakuum und der, für die Neutrino-Detektion in IceCube wichtige, Cherenkov-Effekt erklärt werden. Abschließend soll die Bedeutung der Neutrino-Detektion für die Physik aufgezeigt werden. Danach soll kurz der IceCube-Detektor vorgestellt werden. Hierbei wird sich auf den Aufbau, die Funktionsweise und die Erweiterungen beschränkt. Hauptbestandteil soll dann die Auswahl der Komponenten für den Prototyp sein. Hierzu wird auf alle Komponenten einzeln eingegangen. Im Vordergrund der Untersuchung soll hier aber die drucksichere Glaskapsel und das Gel zur optischen Kopplung der Lichtquelle an die Glaskapsel stehen, da diese bisher noch nicht näher betrachtet wurden. Geschlossen wird die Arbeit mit dem Beginn der Zusammensetzung des ersten POCAM Prototypen.

Inhaltsverzeichnis

1	Neutrinos und ihre Geschichte	1
1.1	Das erste Neutrino	1
1.2	Die Neutrino Flavor des Standardmodells	2
1.2.1	Der Nachweis des Elektron-Neutrinos - 1956	3
1.2.2	Der Nachweis des Myon-Neutrinos - 1962	3
1.2.3	Der Nachweis des Tauon-Neutrinos - 2000	4
1.2.4	Zusammenfassung	4
1.3	Neutrinos und ihre Herkunft	5
1.3.1	Atmosphärische Neutrinos	5
1.3.2	Solare Neutrinos	6
1.4	Neutrino-Oszillation im Vakuum	6
1.5	Neutrino-Detektion mit dem Cherenkov-Effekt	10
1.6	Bedeutung der Neutrino-Detektion	11
2	Das IceCube-Experiment	12
2.1	Experimenteller Aufbau	12
2.2	Funktionsweise	14
2.3	Erweiterungen	15
2.3.1	IceCube-Gen2 Upgrade	15
2.3.2	Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU)	16
3	Das Precision Optical Calibration Module - Der erste Prototyp	17
3.1	Konzept und Motivation	17
3.2	Geant4 Simulation	18
3.3	Elektronik	19
3.4	Integrierende Sphäre	19
3.4.1	Multi-Port Sphäre	19
3.4.2	Semi-Transparente Sphäre	21
3.4.2.1	Material	21
3.4.2.2	Geometrie	22
3.4.3	Ergebnis	23
3.5	Optisches Gel	24
3.5.1	Gründe für die Nutzung	24
3.5.2	Auswahlkriterien	24
3.5.3	Transmissivität	25
3.5.4	Absorption	26
3.5.5	Brechungsindex	27
3.5.5.1	Isotropie & Lichtbrechung	27
3.5.5.2	Schatten	30
3.5.6	Streuung	32
3.5.7	Einsatzfähiger Temperaturbereich	33
3.5.8	Konsistenz & Adhäsion	33
3.5.9	Zusammenfassung	33
3.5.10	Das erste Test-Gel – EGel 3000	34
3.5.10.1	Gel-Mischung & erste Erkenntnisse	34
3.5.10.2	Transmissivität	35
3.6	Drucksichere Glassphäre	36
3.6.1	Geometrie	36
3.6.2	Glas	36
3.6.2.1	Drucksicherheit	37

3.6.2.2	Brechungsindex	37
3.6.2.3	Transmissivität	37
3.6.2.4	Ergebnis	38
3.6.3	Elektrische Verbindung & Vakuumport	38
3.6.3.1	Auswahlkriterien	39
3.6.3.2	Connector	39
3.6.3.3	Vakuum-Port	40
3.6.3.4	Platzierung	41
3.6.3.5	Ergebnis	41
3.7	Der erste Prototyp	42
4	Ausblick	42
	Abbildungsverzeichnis	44
	Tabellenverzeichnis	44
	Literatur	45

1 Neutrinos und ihre Geschichte

Um die Idee des **P**recision **O**ptical **C**Alibration **M**odules, kurz POCAM, und seine Bedeutung für das IceCube-Experiment nachvollziehen zu können, ist es wichtig, die Grundlagen der Neutrino-Physik zu verstehen.

Hierfür soll zunächst auf die Historie der Neutrinos und ihre Entdeckung eingegangen werden. Danach werden wichtige Effekte, wie die Neutrino-Oszillation und der Cherenkov-Effekt zur Detektion, vorgestellt. Geschlossen wird das Kapitel mit der Bedeutung der Neutrino-Detektion für die Physik.

1.1 Das erste Neutrino

Anfang des 20. Jahrhunderts waren nur Protonen, Elektronen und Photonen als subatomare Partikel bekannt. Auch war bekannt, dass Protonen einen Hauptbestandteil des Atomkerns bilden.

Die erste Beschreibung eines Teilchens, das später als Neutrino bekannt werden würde, lieferte Wolfgang Pauli 1930. Dieses, für Pauli noch hypothetische Teilchen, sollte eine Erklärung für den noch nicht verstandenen β -Zerfall liefern.

Das beobachtete Spektrum des Elektrons beim β -Zerfall war nicht wie erwartet diskret, sondern kontinuierlich. Es wurden nämlich nur der Restkern und das ausgesandte Elektron beobachtet. Dies implizierte ein diskretes Spektrum, da die Energien bei einem Zwei-Körper-Zerfall festgelegte Werte annehmen müssten.

Auch schien die Drehimpulserhaltung verletzt, da das Proton und Elektron jeweils halbzahligem Spin besitzen, aber zusammen zu ganzzahligem Spin koppeln.

Hypoth. β -Zerfall ohne Neutrino: $n \rightarrow p^+ + e^-$ $\not\propto$ Energie, Drehimpuls

Im Zuge dessen, postulierte Wolfgang Pauli 1930 in einem offenen Brief ein hypothetisches, neutrales Teilchen, welches zusätzlich beim Zerfall entstehen sollte. Dieses, von ihm als „Neutron“ bezeichnet Teilchen, würde das kontinuierliche Spektrum erklären, da die Energie des Elektrons bei einem Drei-Körper-Zerfall nicht eindeutig festgelegt wäre. Außerdem könnte auch die Drehimpulserhaltung dadurch wieder hergestellt werden, indem es Spin 1/2 trägt. [1]

Pauli's β -Zerfall mit „Neutron“ η^0 : $n \rightarrow p^+ + e^- + \eta^0$

Enrico Fermi war es schließlich, der 1933 dafür den Begriff Neutrino prägte [2]. Dies tat er, um es von Chadwick's gleichzeitig nachgewiesenem, neutralen Kernbaustein, dem heutigen Neutron [3][4], abzugrenzen. Bis dieses Neutrino jedoch experimentell nachgewiesen werden konnte, vergingen noch mehr als 20 Jahre, siehe hierzu Abschnitt 1.2.1.

Heute ist bekannt, dass es zwei Arten von β -Zerfällen gibt, welche beide über die schwache Wechselwirkung ablaufen und unter anderem ein Elektron-Neutrino bzw. Elektron-Antineutrino emittieren:

$$\beta^+ \text{-Zerfall: } \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A}{Z-1}Y + e^+ + \nu_e \quad (1.1)$$

$$\beta^- \text{-Zerfall: } \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A}{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.2)$$

Im nächsten Abschnitt sollen nun die wichtigsten Eigenschaften der Neutrinos zusammengefasst, ihr Rolle im Standardmodell betrachtet und die verschiedenen Flavor erläutert werden.

1.2 Die Neutrino Flavor des Standardmodells

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik setzt sich aus den grundlegendsten Bausteinen zusammen die heute bekannt sind. Es besteht nach heutiger Meßgenauigkeit nur aus Teilchen, die keine innere Struktur aufweisen. Zu diesen Teilchen gehören auch die Neutrinos.

Eine Gruppe des Standardmodells, die sogenannte Familie der Leptonen beinhaltet neben den Neutrinos, das Elektron (e^-), das Myon (μ^-), das Tauon (τ^-) und ihre entsprechenden Anti-Teilchen.

Zusammen mit den Quarks, den Austauschbosonen und dem Higgs-Boson bilden die Leptonen das schon angesprochene Standardmodell, welches in Abbildung 1.1 illustriert ist.

Wichtig für die Physik sind die Eigenschaften der Neutrinos. Da sie elektrisch neutral sind, interagieren sie nicht über die Coulomb-Wechselwirkung. Als Leptonen haben sie keinen Quark-Inhalt und können daher nicht stark wechselwirken.

Da man für Elementarteilchen die Gravitation generell nicht berücksichtigt, interagieren Neutrinos demnach nur über die *schwache Wechselwirkung*.

Neutrinos sind daher sehr schwer nachzuweisen. Zum einen sind Wirkungsquerschnitte der Neutrino-Interaktion sehr klein, was große Detektor-Massen voraussetzt um meßbare Daten zu erhalten. Zum anderen sind die Interaktionen selten, das heißt man braucht lange Meßzeiten um statistisch signifikante Schlüsse ziehen zu können.

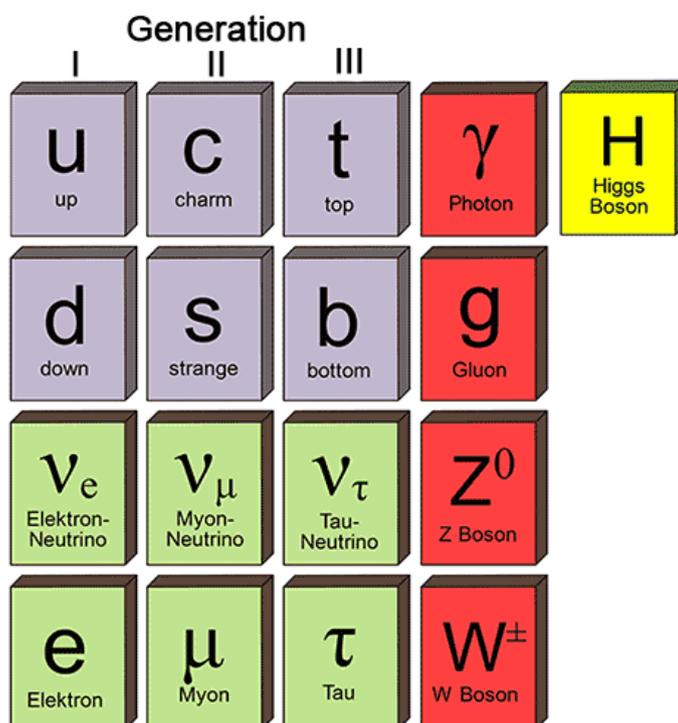


Abbildung 1.1: Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Zu sehen sind alle bekannten **Quarks** (grau), **Leptonen** (grün) und **Eichbosonen** (rot) sowie das **Higgs-Boson** (gelb). Außerdem die Generationen I, II und III, in die das Standardmodell unterteilt ist [5].

Die in Abb. 1.1 durch römische Ziffern angedeuteten drei Generationen bestehen jeweils aus zwei Quarks, einem elektrisch-geladenen Lepton (e^- , μ^- oder τ^-), dem entsprechenden, elektrisch-neutralen Neutrino und den Anti-Teilchen.

Die 1. Generation setzt sich aus *up*- und *down*-Quark, dem Elektron, dem Elektron-Neutrino und deren Anti-Teilchen zusammen. Analog kann man die zweite und dritte Generation formulieren, hierfür sei wieder auf Abbildung 1.1 verwiesen.

Der Neutrino-Flavor ist nun eine Eigenschaft der schwachen Wechselwirkung, die charakteristisch für konkrete leptonische Kopplung ist. Neutrinos selbst sind elektrisch neutral und tragen den Spin $1/2$. Sie unterscheiden sich durch die, bei der schwachen Wechselwirkung teilnehmenden, geladenen Leptonen.

In schwachen, (semi-) leptonischen Prozessen nehmen immer geladene Leptonen (ℓ_α) und Neutrinos (ν_α), desselben Flavors (α), teil. Man definiert daher die sogenannte Leptonen-Familienzahl für Teilchen bzw. Anti-Teilchen des Flavors α , $L_\alpha = \pm 1$, die in den meisten, schwachen Prozessen erhalten ist. Zum Beispiel beim Zerfall des W-Bosons:

$$W^+ \rightarrow \bar{l}_\alpha^+ + \nu_\alpha \quad \text{und} \quad W^- \rightarrow l_\alpha^- + \bar{\nu}_\alpha \quad (1.3)$$

mit $\alpha \in \{e, \mu, \tau\}$, den bekannten Flavorquantenzahlen. Hier ist $L_\alpha = 0 \rightarrow (\mp 1) + (\pm 1) = 0$ in beiden Fällen erhalten.

1.2.1 Der Nachweis des Elektron-Neutrinos - 1956

Das Elektron-Neutrino selbst, entsteht zum Beispiel beim β -Zerfall gemäß (1.1) und wurde als erstes Neutrino 1956 mit dem *Cowan-Reines-Neutrino-Experiment* über sein Anti-Teilchen nachgewiesen [6].

Hierzu benutzten Cowan und Reines einen Kernreaktor als Neutrino-Quelle. Die emittierten Anti-Neutrinos sollten dann mit Protonen in Wechselwirkung treten, welche sich in einem Wassertank befanden, der den Reaktor umschloss:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

Die entstandenen Positronen erzeugen dann durch Streuprozesse Photonen, welche, mit Hilfe von Szintillatoren und Photo-Multipliern, nachgewiesen werden sollten. Bei den Neutronen sollte der Nachweis mit Hilfe eines Cadmium-Isotops geschehen. Da die beiden vorhergesagten Prozesse

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma \quad (1.4)$$

$$n + {}^{113}\text{Cd} \rightarrow {}^{114}\text{Cd} + \gamma \quad (1.5)$$

bestätigt werden konnten, also sowohl die Photonen der erwarteten Reaktion der Positronen (1.4), als auch die der Neutronen (1.5), beobachtet wurden, ließ dies den Schluss der Elektron-Neutrino-Existenz zu. [7]

Für diese Erkenntnis und weitere Folgerungen zur Leptonen-Physik, erhielt Reines 1995 den Nobelpreis für Physik [8].

1.2.2 Der Nachweis des Myon-Neutrinos - 1962

Es folgte 1962 der Nachweis eines weiteren, neuen Neutrinos durch ein Experiment von Melvin Schwartz, Leon Lederman und Jack Steinberger. An einem *Alternating Gradient Synchrotron* in Brookhaven wurden Pionen- und Kaonenstrahlen durch Protonenstreuung an einem Beryllium-Target erzeugt. Die entstandenen Pionen und Kaonen zerfielen, zum Beispiel gemäß:

$$\pi \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$$

Die entstandenen, geladenen Teilchen wurden durch eine Stahlabschirmung herausgefördert. Übrig blieben schließlich nur noch die Neutrinos (bzw. Anti-Neutrinos), welche in die Funkenkammer aus Aluminiumplatten, gelangen konnten. Durch Analyse der im Detektor

nachgewiesenen Teilchendaten und -bahnen, konnte das entstandene Neutrino klar vom zuvor entdeckten Elektron-Neutrino abgegrenzt werden.

Da es zusammen mit einem Myon entstand erhielt es entsprechend den Flavor $x = \mu$, also Myon-Neutrino ν_μ . ([9], S. 8-9)

Im Jahr 1988 erhielten die drei Experimentalisten für diese Entdeckung und weitere Folgerungen den Nobelpreis für Physik [10].

1.2.3 Der Nachweis des Tauon-Neutrinos - 2000

Als man 1975 das Tauon entdeckte [11], erwartete man ebenso wie für die anderen Leptonen, ein Tauon-Neutrino. Dieses wurde aber erst im Jahr 2000 mit dem *DONUT-Experiment* experimentell nachgewiesen. Durchgeführt wurde es am berühmten Fermilab (E872) und war darauf ausgelegt direkte Tauon-Neutrino Interaktionen nachzuweisen.

Hierfür wurde ein Protonenstrahl mit hoher Energie auf einen Wolframblock (^{74}W) geschossen, wodurch man unter anderem die Entstehung von Tauon-Neutrinos, aus dem Zerfall von D-Mesonen, erwartete. Dieser Strahl durchlief dann eine Reihe von Filtern (größtenteils Eisen und Beton), um unerwünschte Teilchen abzuschirmen und nur Neutrinos in die Detektorkammer zu lassen. Diese bestand aus einer Reihe von Szintillatoren und Driftkammern, mit welchen schlussendlich einzelne aber aussagekräftige Ereignisse von Tauon-Neutrinos nachgewiesen werden konnten. [12]

Dies bestätigte die Existenz eines dritten Neutrinos, welches entsprechend als Tauon-Neutrino (ν_τ) bezeichnet wurde, und das Standardmodell war, mit der Entdeckung des Higgs-Bosons im Jahr 2012 am LHC, komplett.

1.2.4 Zusammenfassung

Bis heute sind drei Arten von Neutrinos bekannt. Elektron-, Myon- und Tauonneutrino. Diese Unterscheidung nennt man Flavor. Und zwar, weil verschiedene Neutrino-Flavor unter der schwachen Wechselwirkung verschieden wechselwirken. Wenn ein Neutrino eines Flavors in einem schwachen Prozess teilnimmt, nimmt auch das Lepton desselben Flavors teil, dies impliziert die Erhaltung der Leptonen-Familienzahl L_α .

In der folgenden Tabelle 1.1 sind die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Flavor zusammengefasst:

Neutrino Flavor	ν_e	ν_μ	ν_τ
Masse [MeV/c^2]	$< 7.2 \cdot 10^{-6}$	< 0.17	< 18.2
Ladung [e]	0	0	0
Spin [\hbar]	1/2	1/2	1/2
Partner-Lepton	e^-	μ^-	τ^-

Tabelle 1.1: Eigenschaften der bekannten Neutrino Flavor e , μ und τ . Angegeben ist die Massenobergrenze ([13], S. 491-493) sowie jeweils Ladung, Spin und Partner-Lepton der schwachen Wechselwirkung.

Hier sei angemerkt, dass Neutrinos nach dem Standardmodell keine Masse besitzen. Erst mit der Beobachtung der Neutrino-Oszillation, die im Jahr 2015 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde [23], war es unbestreitbar, dass Neutrinos eine Masse besitzen. Auf die Neutrino-Oszillation wird in Abschnitt 1.4 noch gesondert eingegangen. Die Masse erhalten Neutrinos, nach heutiger Kenntnis, durch die Interaktion mit dem Higgs-Feld.

1.3 Neutrinos und ihre Herkunft

Neben künstlichen Neutrino-Quellen auf der Erde wie Reaktoren oder Beschleunigern gibt es auch natürliche Quellen im Universum.

Besonders interessant für die Physik sind dabei Neutrinos, die bei energiereichen Ereignissen oder Prozessen im Universum entstehen, wie Supernovae oder Gamma-Ray-Bursts. Auch Neutronen-Sterne und sogar die Sonne emittieren Neutrinos.

Da Neutrinos so selten mit Materie interagieren, sind solche aus natürlichen Quellen, die idealen Forschungsobjekte um mehr über das Universum und dessen Geschichte zu erfahren. Außerdem werden sie nicht durch das Magnetfeld der Erde abgeschirmt und ermöglichen so einen ungefilterten und aufschlussreichen Blick auf z.B. die in der Sonne ablaufenden Prozesse, Ereignisse im All oder sogar den Big Bang.

1.3.1 Atmosphärische Neutrinos

Die hochenergetische, kosmische Strahlung die stetig auf die Erde trifft, besteht zu einem Großteil aus Protonen. Diese treffen mit hohen Energien, der Größenordnung 10^{15} eV, auf die Erdatmosphäre und erzeugen kosmische Teilchenschauer. Ein solcher ist in Abbildung 1.2 beispielhaft skizziert.

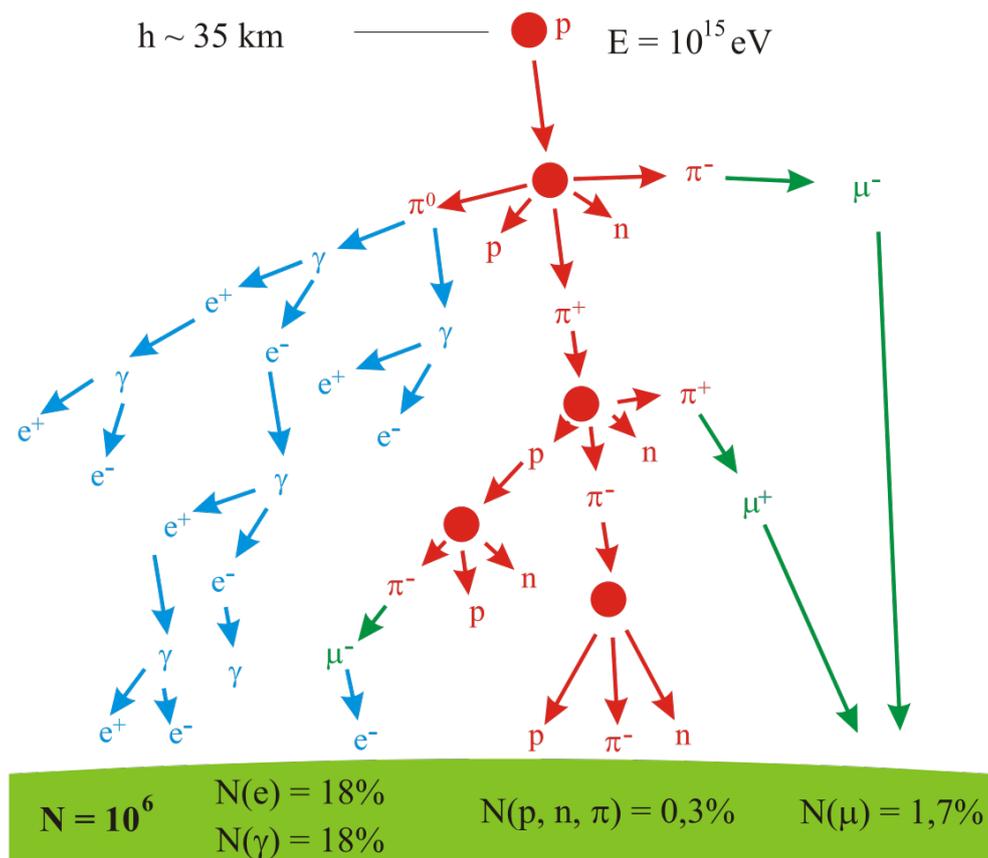


Abbildung 1.2: Ein beispielhafter Teilchenschauer, ausgelöst durch ein hochenergetisches kosmisches Proton. Zu sehen sind die Zerfälle in der Erdatmosphäre in **Pionen** (π^α , rot) und **Nukleonen** (n und p , rot), sowie deren weitere Zerfälle in **Myonen** (μ^\pm , grün), **Elektronen** (e^- , blau), **Positronen** (e^+ , blau), und **Photonen** (γ , blau) [24].

In diesen Teilchenschauern entstehen unter anderem Mesonen. Mesonen sind Teilchen bestehend aus einem Quark-Antiquark-Paar, welche meist nur kurze Lebensdauern aufweisen. Diese zerfallen auf ihrem Weg Richtung Erdoberfläche weiter. Den häufigsten Zerfall stellt hierbei das geladene Pion dar, das meist wie folgt zerfällt:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.6)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.7)$$

Das Myon wiederum zerfällt weiter, größtenteils gemäß:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.8)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.9)$$

Diese Neutrinos nennt man auch *atmosphärische Neutrinos*, da sie in der Erdatmosphäre entstehen. ([13], S. 390-391)

Überall auf der Erde entstehen sie aufgrund von kosmischer Strahlung. Mithilfe von z.B. dem Cherenkov-Effekt, der in Kapitel 1.5 beschrieben wird, kann man diese nachweisen. Interessant ist hier zum Beispiel das nahezu konstante Verhältnis 2/1 von ν_μ/ν_e , das schon aus den Gleichungen (1.6)-(1.9) ersichtlich ist.

1.3.2 Solare Neutrinos

Die Sonne ist im Grunde ein enorm leistungsstarker Fusionsreaktor. Hierbei entstehen Elektron-Neutrinos mit Energien der Größenordnung 1 MeV. Diese Neutrinos können wegen ihrer geringen Wechselwirkung mit Materie praktisch ungestört aus der Sonne in alle Richtungen abstrahlen. Wegen ihrer Herkunft nennt man solche Neutrinos auch *solare Neutrinos*.

Obwohl der Neutrino-Fluss der Sonne extrem hoch ist, braucht man, wegen des kleinen Wirkungsquerschnitts, große Detektoren um sie nachzuweisen. Außerdem müssen diese gegen kosmische Strahlung abgeschirmt sein, da sonst deren zahlreiche Interaktionen im Detektor, die der solaren Neutrinos komplett überschatten würden. Eine Detektion von solaren Neutrinos wäre so praktisch unmöglich.

Als erstes nachgewiesen wurden solare Neutrinos im Jahr 1970 im *Homestake Experiment*. Weitere erfolgreiche Experimente in diesem Bereich waren in den späten 80er Jahren das *Kamiokande Experiment* und Ende der 90er Jahre das *Super-Kamiokande* sowie das *SNO Experiment*. Letztere lieferten wichtige hochpräzise Resultate des solaren Neutrino-Flusses. Während solare Neutrinos heute hauptsächlich zur Untersuchung von Neutrino-Eigenschaften genutzt werden, war einer der eigentlichen Erfolge der ersten Detektion, die Verifizierung der thermonuklearen Energieproduktion im Inneren von Sternen. ([13], S. 352-353)

1.4 Neutrino-Oszillation im Vakuum

Wie zu Beginn schon angedeutet, ist die Masse der Neutrinos nicht eindeutig. Eine Oszillation zwischen Neutrinos und Anti-Neutrinos wurde schon in den 50er Jahren von Pontecorvo vorgeschlagen, jedoch nicht bewiesen.

Es soll nun die Neutrino-Oszillation im Vakuum betrachtet werden, gemäß [14]. Angenommen Neutrinos haben eine Masse, dann gibt es schwache Neutrino-Massen-Eigenzustände (NME)

$$\{\nu_i\} \quad \text{mit} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (1.10)$$

und schwache Lepton-Massen-Eigenzustände (LME)

$$\{\ell_\alpha\} \quad \text{mit} \quad \alpha = e, \mu, \tau, \dots \quad (1.11)$$

Die schwache Wechselwirkung, die das W-Boson an ein Lepton und ein Neutrino koppelt, ist durch Symmetriebrechung in ihren Flavor-Eigenzuständen vermischt. Das heißt sie kann einen LME (ℓ_α) an einen beliebigen NME (ν_i) koppeln.

Konkret heißt das, dass sich das in dem Zerfall entstehende Neutrino (bzw. Anti-Neutrino):

$$W^+ \rightarrow \ell_\alpha^+ + \nu_\alpha \quad (\text{bzw. } W^- \rightarrow \ell_\alpha^- + \bar{\nu}_\alpha) \quad (1.12)$$

in einem Überlagerungszustand von diskreten NME'n befinden muss, da seine Flavor-Eigenzustände nicht mit seinen Massen-Eigenzuständen übereinstimmen:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad (\alpha = e, \mu, \tau) \quad (1.13)$$

Hierbei ist $U_{\alpha i}^*$ eine gewichtende Mischungsmatrix, die zwar unitär ist, aber nicht die Einheitsmatrix darstellt. Wie schon erwähnt, bedeutet das, dass, in der schwachen Wechselwirkung, die Flavor-Eigenzustände verschieden von den Masse-Eigenzuständen der Neutrinos sind. Das ist die theoretische Grundlage der Neutrino-Oszillation.

Die Superposition von NME'n des produzierten Neutrinos (1.13), in Verbindung mit dem geladenen Lepton α (1.12), ist das *Neutrino mit Flavor α* .

Während bis heute nur drei geladene LME bekannt sind, legen experimentelle Resultate, wie die „Reaktor Antineutrino Anomalie“ [25], nahe, dass es vielleicht mehr als drei NME gibt.

Wenn wir annehmen, es gäbe vier NME, dann würde ein Zustand

$$|\nu_s\rangle = \sum_i U_{si}^* |\nu_i\rangle \quad (1.14)$$

existieren, der keinen bekannten, geladenen Lepton-Partner hat und deshalb nicht ans W-Boson koppeln kann.

Mithilfe von Collider-Experimenten hat man auch nachgewiesen, dass der Zerfall des Z-Bosons in ein Neutrino-Anti-Neutrino-Paar ($Z \rightarrow \nu_\alpha \bar{\nu}_\alpha$) konsistent mit der Teilnahme von drei Generationen, oder Flavor-Sorten, ist [28]. Das heißt, es kann auch nicht ans Z-Boson und damit nicht an die schwache Wechselwirkung koppeln.

Solch ein hypothetisches Teilchen wird deshalb auch als *steriles Neutrino* bezeichnet.

Im Fall von drei LME'n kann man die Gewichtungsmatrix $U_{\alpha k}^*$ explizit ausschreiben. Man erhält die unitäre, sogenannte Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata- Matrix:

$$U = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \stackrel{\text{exp}}{\underset{[36]}{=}} \begin{pmatrix} 0.826 & 0.544 & 0.151 \\ 0.427 & 0.642 & 0.635 \\ 0.368 & 0.540 & 0.757 \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

Hierbei sind $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$ und $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$ mit den Mischungswinkeln θ_{ij} . Die Parameter δ, α_1 und α_2 sind die Phasen, die die CP-Erhaltung verletzen. Hierbei haben α_1 und α_2 nur physikalische Bedeutung, falls Neutrinos sogenannte *Majorana Teilchen*, also ihre eigenen Anti-Teilchen, sind. Auf die Neutrino Oszillation selbst haben sie keinen Einfluss. Die genaue Bestimmung dieser Parameter ist Gegenstand aktueller Forschung.

Um die eigentliche Oszillation der Neutrinos zu verstehen betrachtet man den zeitabhängigen Fall der Ausbreitung eines Neutrinos mit Flavor α , analog zu [14]. Hier kann man, wegen der kleinen Massen (siehe Tabelle 1.1) aber den vergleichsweise hohen Energien (> 100 keV) die für eine Detektion benötigt werden, annehmen, dass sich Neutrinos ultrarelativistisch bewegen, das heißt:

$$v_\nu \approx c \quad (1.16)$$

Geht man von einem Neutrino im Zustand (1.13) aus und betrachtet den zeitlichen Verlauf, erhält man unter Benutzung der Schrödinger-Gleichung und dem Ansatz für ebene Wellen

$$|\nu_i\rangle = e^{-im_i\tau_i} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.17)$$

mit der Masse m_i des NME ν_i , der Zeit τ_i im Bezugssystem von ν_i und $\hbar = c = 1$.

Den Phasenfaktor kann man mit einer Lorentz-Transformation ins Laborsystem überführen. Mit der Zeit t und der Strecke L im Laborsystem gilt:

$$e^{-im_i\tau_i} = e^{-i(E_it - p_iL)} \quad (1.18)$$

mit der Energie E_i und dem Impuls p_i des Neutrinos im Laborsystem.

Wegen (1.16) ist $t \approx L$ und (1.18) wird zu:

$$e^{-i(E_it - p_iL)} \approx e^{-i(E_i - p_i)L} \quad (1.19)$$

Wenn man nun davon ausgeht, dass das Neutrino mit einem bestimmten Impuls p erzeugt wurde, so dass alle NME diesen Impuls haben, also $p_i \approx p$. Dann ist die Energie E_i gegeben durch die relativistische Energie-Impuls-Beziehung.

Unter der Annahme, dass $m_i \ll p$ gilt, folgt:

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p} \quad (1.20)$$

Damit wird (1.19) zu:

$$e^{-i(E_i - p)L} \approx e^{-i(m_i^2/(2p))L} \quad (1.21)$$

Daraus kann man schließen, dass sich die Phase eines Neutrinos, das im Zustand (1.13) erzeugt wurde und im Laborsystem eine Strecke L zurückgelegt hat, wie folgt geändert hat:

$$|\nu_\alpha(L)\rangle \approx \sum_i U_{\alpha i}^* e^{-i(m_i^2/(2E))L} |\nu_i\rangle \quad (1.22)$$

Wobei $E \simeq p$ die mittlere Energie der Komponenten der NME ist.

Da U , nach Voraussetzung, unitär ist kann man (1.13) invertieren und in (1.22) einsetzen und erhält:

$$|\nu_\alpha(L)\rangle \approx \sum_\beta \left[\sum_i U_{\alpha i}^* e^{-i(m_i^2/(2E))L} U_{\beta i} \right] |\nu_\beta\rangle \quad (1.23)$$

Hier sieht man, dass das Neutrino nach der zurückgelegten Strecke L nun eine Superposition aller NME darstellt, was als *Neutrino-Oszillation* bezeichnet wird. Das heißt, ein propagierendes Neutrino oszilliert zwischen seinen Flavorzuständen.

Für die Wahrscheinlichkeit es nach der Strecke L im Flavor β zu finden berechnet man $|\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(L) \rangle|^2$. Mit (1.23) und der Unitarität von U wird daraus:

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} \\
 &- 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[\Delta m_{ij}^2 \cdot \frac{L}{4E} \right] \\
 &+ 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[\Delta m_{ij}^2 \cdot \frac{L}{2E} \right]
 \end{aligned} \tag{1.24}$$

mit $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ und $i, j \in \{1, 2, 3\}$. Hier sind m_1 , m_2 und m_3 die Massen der Neutrino-Massen-Eigenzustände ν_1 , ν_2 und ν_3 . [14]

Die Massenhierarchie der Neutrinos ist bis heute nicht vollständig geklärt. Es gibt zwei mögliche Hierarchien, die normale Hierarchie mit $m_1 < m_2 < m_3$ und die inverse Hierarchie mit $m_3 < m_1 < m_2$. Veranschaulicht ist die Zusammensetzung der verschiedenen Hierarchien und ihrer NME in Abbildung 1.3. Die Verifizierung einer dieser beiden Hierarchien ist Gegenstand aktueller Forschung [16].

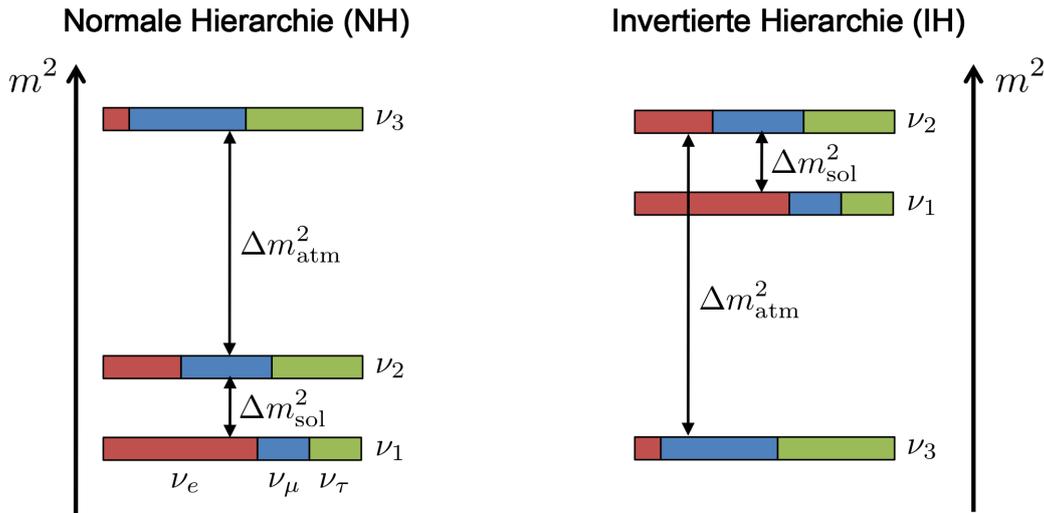


Abbildung 1.3: Neutrino-Masse-Eigenzustände ν_1 , ν_2 und ν_3 in normaler Hierarchie (links) und inverser Hierarchie (rechts) und der Mischung aus ν_e (rot), ν_μ (blau) und ν_τ (grün) gemäß der schwachen Wechselwirkung [16]. Hierbei bezeichnen $\Delta m_{sol}^2 = m_2^2 - m_1^2$, die *solare* Differenz und $\Delta m_{atm}^2 = m_3^2 - m_2^2$, die *atmosphärische* Differenz der NME [22].

Zusammenfassend bedeutet das, dass propagierende Neutrinos zwischen ihren Flavor-Zuständen oszillieren. Vor allem ist die Wahrscheinlichkeit aus (1.24), ein Neutrino in einem Flavor-Zustand zu finden, der verschieden von seinem Anfangszustand ist, nicht 0. ([13], S.249-253) [14]

Schließlich sei noch angemerkt, dass ähnliche Rechnungen auch für die Oszillation in Materie gemacht werden können, indem man von effektiven Potentialen in der Schrödinger-Gleichung ausgeht. Dies würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen und es sei dafür auf [13], S. 322-351 verwiesen.

1.5 Neutrino-Detektion mit dem Cherenkov-Effekt

Entscheidend für den später betrachteten IceCube-Detektor ist der Cherenkov-Effekt. Man kann diesen Benutzen, um Neutrinos nachzuweisen.

Neutrinos wechselwirken in Materie, wie zum Beispiel schwerem Wasser oder Eis, mit den dort vorhandenen Atomen und setzen Sekundärteilchen frei. Diese senden dann unter gewissen Voraussetzungen sogenanntes *Cherenkov-Licht* aus, das detektiert werden kann. Im später behandelten IceCube-Detektor benutzt man dies um die Energie und Herkunft von Neutrinos zu bestimmen.

Der Cherenkov-Effekt tritt auf, wenn sich geladene Teilchen mit einer Geschwindigkeit v_{Teilchen} durch dielektrische Materie mit Brechungsindex n , bewegen, die die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium, c_{Medium} , übersteigt. Das heißt wenn gilt:

$$v_{\text{Teilchen}} > c_{\text{Medium}} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{n} \quad (1.25)$$

Wenn elektrisch geladene Teilchen durch dielektrische Materie propagieren wird diese kurzzeitig durch das elektrische Feld gestört.

Im Fall $v_{\text{Teilchen}} < c_{\text{Medium}}$, also wenn (1.25) nicht gilt, ist die Relaxation des Mediums ins Gleichgewicht schneller als die Ausbreitung der Polarisation. Jegliche durch die Polarisation entstandene Strahlung löscht sich daher wegen der sphärischen Symmetrie wieder aus und es wird effektiv keine Strahlung emittiert.

Wenn aber die Energien hoch genug sind, dass (1.25) gilt, dann ist die Relaxation des Mediums langsamer als die Ausbreitung des Teilchens, was zu einer kurzzeitigen asymmetrischen Polarisation entlang der Teilchenbahn führt. Eine Illustration dieser beschriebenen Asymmetrie ist in Abbildung 1.4 zu sehen.

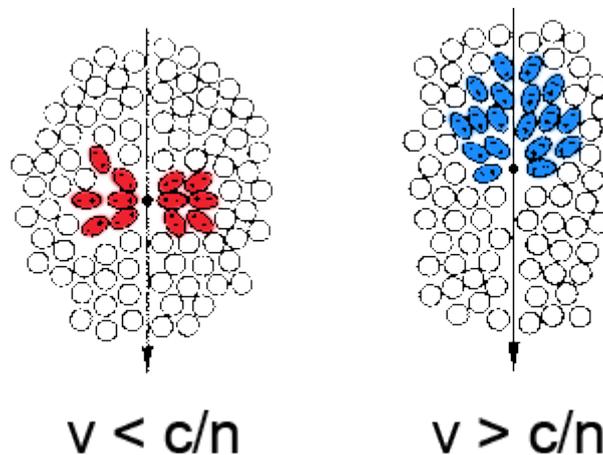


Abbildung 1.4: Zu sehen ist das propagieren eines geladenen Teilchens durch ein dielektrisches Medium n mit $v_{\text{Teilchen}} < \frac{c}{n}$ (links) und $v_{\text{Teilchen}} > \frac{c}{n}$ (rechts). Rechts ist die **Polarisierung** deutlich asymmetrisch (blau), links ist sie symmetrisch (rot) [19].

Diese Polarisation erzeugt elektromagnetischen Wellen welche nun wegen der Asymmetrie nicht mehr destruktiv interferieren und es resultiert Strahlung. Diesen Effekt, nennt man, nach seinem Entdecker, den *Cherenkov-Effekt*. Das dabei entstehende Cherenkov-Licht wird kegelförmig abgestrahlt, gemäß:

$$\cos(\theta) = \frac{c_{\text{Medium}}}{v_{\text{Teilchen}}} = \frac{1}{n\beta} \quad (1.26)$$

Wobei θ der Abstrahlwinkel und β der Quotient aus Teilchengeschwindigkeit und Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist. Der Vorgang ist auch in Abbildung 1.5a) dargestellt. [19][20]

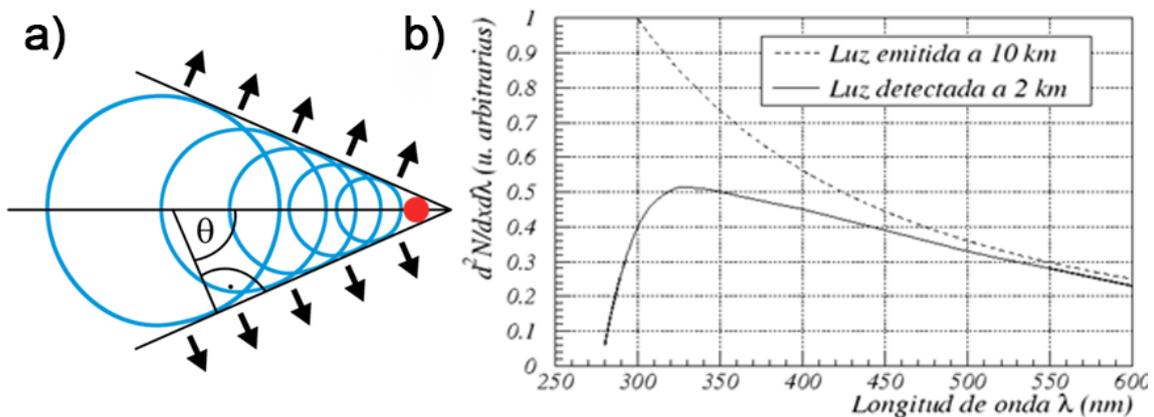


Abbildung 1.5: **a)** Man sieht ein **geladenes Teilchen** (rot), das mit $v_{\text{Teilchen}} > \frac{c}{n}$ durch ein Medium n propagiert und dabei kegelförmig **Cherenkov-Emission** (blau) auslöst. Außerdem eingezeichnet sind die kegelförmig entstehenden **Wellenfronten** (schwarz) unter dem **Abstrahlwinkel** θ gemäß (1.26) [21] **b)** Das differentielle, theoretische Energiespektrum des emittierten Cherenkov-Lichts in 10km Höhe (gestrichelt) und des detektierten Lichts in 2km Höhe (durchgezogen). Aufgetragen ist die differentielle Anzahl an Photonen pro Wegstrecke und pro Wellenlänge bzw. Energie gegen deren Wellenlänge. Für die gestrichelte Theorie-Kurve ist der typische $1/\lambda^2$ Verlauf zu sehen [47].

Durch Detektion dieses Cherenkov-Lichts aus Neutrino Interaktionen in einem Array aus einer Vielzahl von Photosensoren kann dieser Lichtkegel detektiert werden. Je nach experimentellem Aufbau können dann Aussagen über Energie, Flugbahn oder Flavor des Neutrinos getroffen werden. Neutrinos welcher Energie beobachtbar sind, hängt sensibel vom konkreten Photosensor-Array ab.

1.6 Bedeutung der Neutrino-Detektion

Die Detektion von Neutrinos ist zwar kompliziert aber vielversprechend. Zum einen bieten Neutrinos die Möglichkeit Umgebungen zu untersuchen, die mit keinem anderen bekannten Mittel erforscht werden können. Das erste solche Forschungsgebiet waren die Fusionsprozesse im Inneren der Sonne, wie in Abschnitt 1.3.2 erläutert. Hier können Neutrinos die Sonne fast ungehindert verlassen, während Photonen mehrere tausend Jahre brauchen, um an die Oberfläche zu diffundieren.

Zum anderen sind Neutrinos die einzig bekannten Teilchen, die das interstellare Medium beinahe ungehindert passieren können. Photonen werden durch Staub, Gas und Hintergrundstrahlung beeinflusst. Hochenergetische kosmische Strahlung, zum Beispiel aus Gamma-Ray-Bursts, ist in ihrer Ausbreitung durch die Greisen-Zatsepin-Kuzmin Grenze beschränkt [15]. Die genaue Beobachtung von weit entfernten Objekten gestaltet sich darüber eher schwierig.

Die Neutrino-Detektion ist also ein wichtiges Mittel zur Untersuchung von kosmischen Prozessen und zur Einsicht in Vorgänge im Universum, die mit herkömmlicher Astronomie nicht möglich wären.

2 Das IceCube-Experiment

In diesem Kapitel soll das IceCube Experiment vorgestellt werden, da es das Anwendungsgebiet für das Precision Optical Calibraton Module, kurz POCAM, darstellt. Hierbei werden der Aufbau des Detektors, seine Funktionsweise und die geplanten Erweiterungen erläutert.

2.1 Experimenteller Aufbau

Der IceCube Detektor ist einer der größten, auf Neutrinos spezialisierten Detektoren und befindet sich am Südpol. Seit 2010 sucht man damit nach Quellen von hochenergetischen, kosmischen Neutrinos. Außerdem erlaubt er auch eine genauere Untersuchung der Neutrinos selbst und damit zum Beispiel der Neutrino-Oszillation.

Der eigentliche Detektor, der in Abbildung 2.1 dargestellt ist, füllt ein Volumen von fast einem Kubikkilometer antarktischen Eis. Dies ist nötig, da der Wirkungsquerschnitt von Neutrinos sehr klein ist. Eine Detektion wird also umso wahrscheinlicher, je größer die Detektormasse ist.

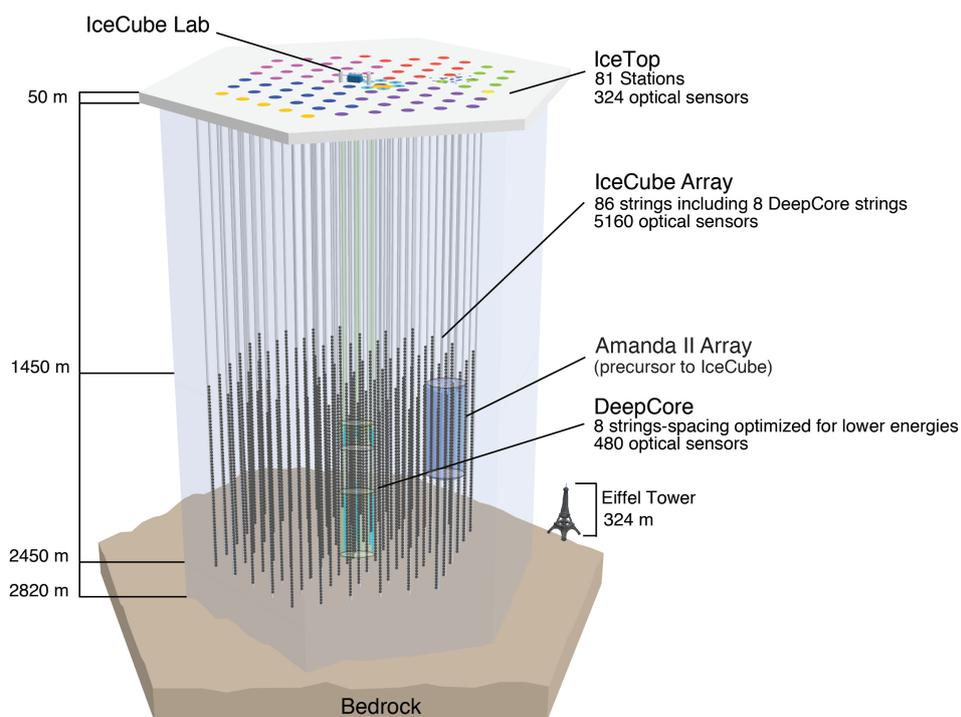


Abbildung 2.1: Der Aufbau des IceCube-Detektors. Zu sehen ist das gesamte IceCube Array mit dem hexagonalen **IceTop** (oben), dem **Amanda II Array** (dunkelblau), dem **Deep Core** (cyan) und dem Eiffelturm zum Größenvergleich [18].

Das Eis des IceTop ist, wie in Abbildung 2.1 zu sehen, mit 86 hexagonal angeordneten, knapp 2500m tiefen, Bohrlöchern versehen. In jedem dieser Bohrlöcher wurde ein sogenannter *String* eingelassen. Ein String ist eine Anordnung von 60 *Digitalen optischen Modulen*, kurz DOM's, die elektrisch verbunden sind. In Abbildung 2.2 ist das Schema gezeigt.

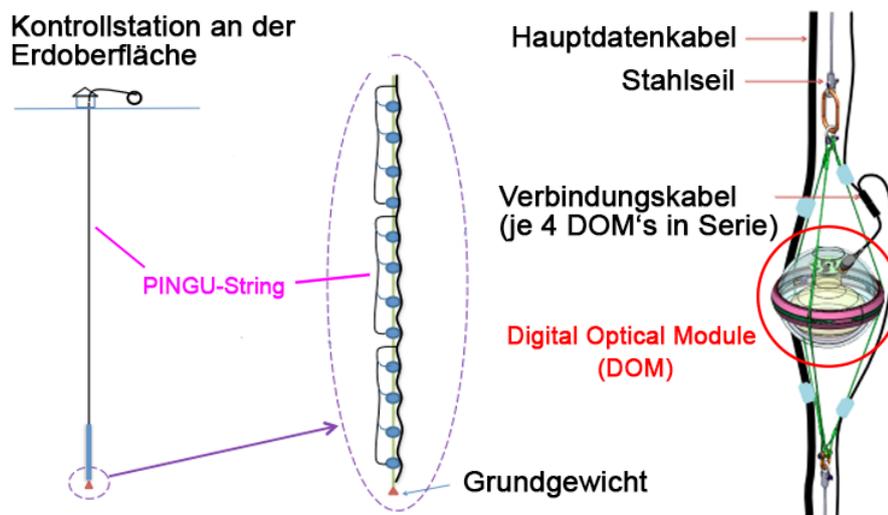


Abbildung 2.2: Hier zu sehen ist ein String des geplanten IceCube Upgrades PINGU als Ganzes (links), der Aufbau eines Strings mit den DOM's (mittig) und der detaillierte Einbau der DOM's (rechts). Die Schematik ist die Gleiche wie im IceCube, lediglich der Abstand der DOM's und die DOM's selbst sind etwas unterschiedlich [26].

Insgesamt besteht der große IceCube-Detektor also aus 5160 solcher DOM's. Die DOM's selbst sind Glaskugeln, die in der unteren Hälfte mit Photomultipliern (PMT), zum Photonennachweis und in der oberen Hälfte mit der gesamten, notwendigen Elektronik ausgestattet sind. Der Aufbau des DOM's ist in Abbildung 2.3 illustriert.

Die DOM's registrieren Neutrinos, indem sie das *Cherenkov-Licht* von Sekundärteilchen, die von Neutrinos im Eis erzeugt werden, detektieren. Dieser Vorgang wird in Abschnitt 2.2 beschrieben. [17]

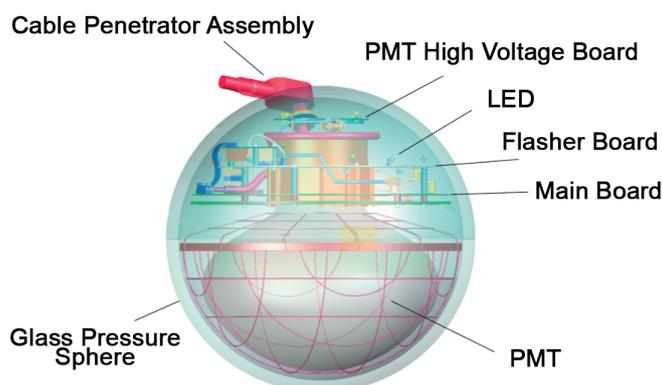


Abbildung 2.3: Hier zu sehen ist ein digitales optisches Modul (DOM) des IceCube-Detektors. In der unteren Hälfte der Glassphäre sieht man den Photomultiplier (PMT), in der oberen die notwendige Elektronik sowie den „Cable Penetrator Assembly“ (rot), der die innere Elektronik mit dem Datenkabel verbindet [27].

2.2 Funktionsweise

Während DeepCore eine Detektion ab $E_\nu = 10$ GeV ermöglicht, ist IceCube im Gesamten dafür ausgelegt, Neutrinos mit Energien größer als 100 GeV zu detektieren. [17]

Da das Eis andere Teilchen größtenteils abschirmt, wechselwirken dort nur Neutrinos. Diese geschieht, wie erwähnt, nur durch schwache Prozesse und zwar entweder durch geladene Ströme, also Austausch eines W-Bosons oder durch neutrale Ströme, also Austausch eines Z-Bosons. Für die detektierbaren Neutrinos von IceCube ($E_\nu > 100$ GeV) dominieren die inelastischen Prozesse mit Nukleonen im Eis, gemäß [33]:



In den Fällen von geladenen Strömen, (2.1) und (2.2), senden die geladenen Leptonen beim propagieren durch ein optisches Medium mit genügend hoher Geschwindigkeit (siehe Gl. (1.25)) Cherenkov-Licht aus, das detektiert werden kann.

Im Falle von Hadronen-Erzeugung, also den neutralen Strömen (2.3) bzw. (2.4), erzeugen diese im Eis selbst hadronische Kaskaden, von denen geladene Erzeugnisse wiederum detektierbares Cherenkov-Licht emittieren wenn sie entsprechend schnell sind.

Das erzeugte Cherenkov Licht wird von den DOM's registriert. Sie senden die Daten dann inklusive Zeitpunkt der Registration an Computer, die sich an der Oberfläche befinden. Mit den Daten kann dann ein Lichtmuster des gesamten IceCube Arrays erstellt werden, auf dem ersichtlich ist, wo und wann Licht detektiert wurde. So kann Energie, Flavor, Flugbahn und damit Herkunft, des Neutrinos bestimmt werden. Ein Beispiel für solch eine Detektion ist in Abbildung 2.4 dargesellt. [17]

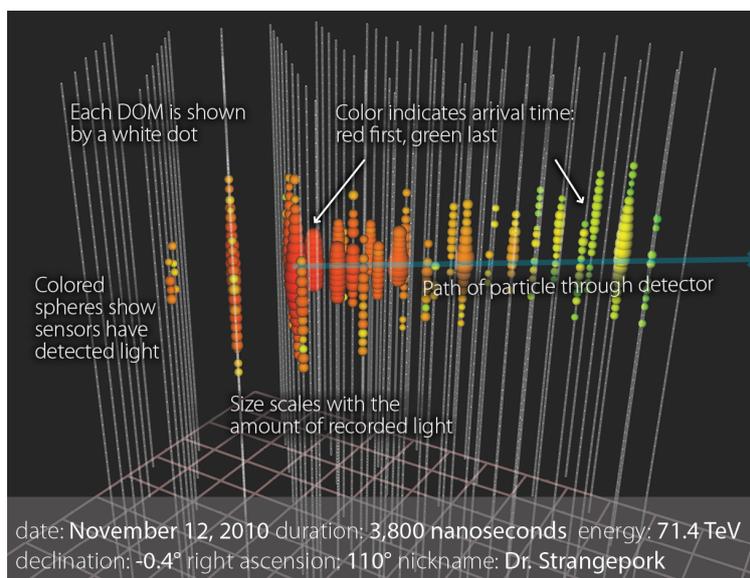


Abbildung 2.4: Zu sehen ist eine Neutrino-Detektion im IceCube-Array vom 12. November 2010 mit Strings und DOM's. Farbige DOM's bedeuten Licht-Detektion, wobei die Größe der gemessenen Lichtmenge entspricht. Die Farben entsprechen den Zeitpunkten der Detektion von „rot = früh“ bis „grün = spät“ [29].

Der IceCube-Detektor ist also im Wesentlichen ein Neutrino-Teleskop, das Neutrino-Wechselwirkung im arktischen Eis nachweisen, sowie Energie, Flavor und Flugbahn, der beteiligten Neutrinos bestimmen kann.

Außerdem ermöglicht der dicht mit DOM's besiedelte Deep Core zusätzlich die Untersuchung von niederenergetischen Neutrinos und damit der Neutrino-Oszillation.

2.3 Erweiterungen

Das IceCube-Experiment hat aufgrund seiner Effektivität schnell den Wunsch geweckt, es noch weiter zu vergrößern und seine Detektion zu verfeinern. Daher sind für die kommenden Jahre Erweiterungen des Detektors geplant, die dies ermöglichen sollen.

2.3.1 IceCube-Gen2 Upgrade

Die wohl größte, geplante Erweiterung ist das sogenannte *IceCube Upgrade Gen2*. Ziel ist es das Detektorvolumen zu verzehnfachen. Der Detektor sollte dann ein Volumen von rund zehn Kubikkilometern antarktischen Eis aufweisen.

Dies ist möglich, da beim Aufbau des eigentlichen IceCube-Detektors festgestellt wurde, dass das Eis deutlich reiner ist als vorher gedacht. Man kann daher die Strings noch weiter voneinander entfernt einlassen und so mit moderaten Aufwand ein viel größeres Detektorvolumen erreichen.

Die so erhöhte Detektormasse hat physikalisch gesehen den Vorteil, dass nun über noch höherenergetische Neutrinos, im PeV bis EeV Bereich, statistisch signifikante Aussagen getroffen werden können. [31] Ein Größenvergleich der beiden Projekte IceCube und IceCube-Gen2 ist in Abbildung 2.5 gezeigt.

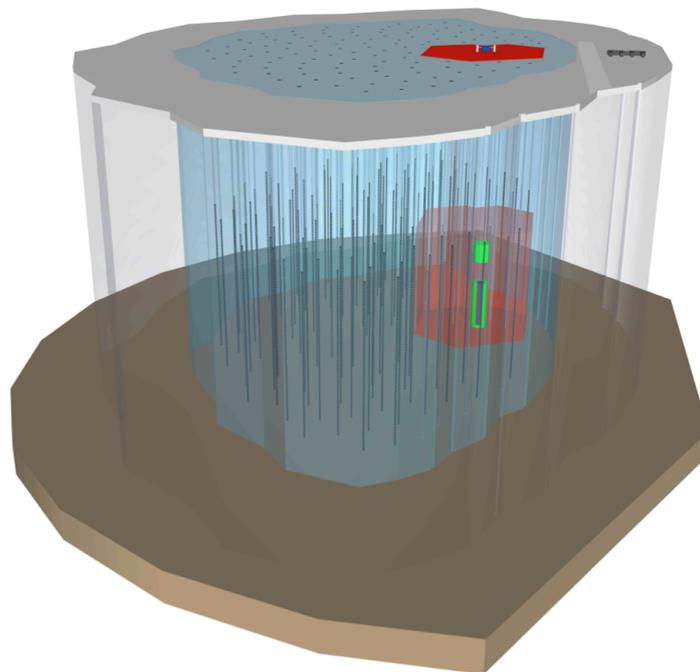


Abbildung 2.5: Das geplante Upgrade des IceCube-Detektors IceCube-Gen2 im Größenvergleich. Zu sehen ist der jetzige **IceCube-Detektor** (rot), der **DeepCore** (grün) und das geplante Upgrade **IceCube-Gen2** (blau) im direkten Vergleich [30].

2.3.2 Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU)

Ein weiteres geplantes Projekt ist das „Precision IceCube Next Generation Upgrade“, kurz PINGU. Hierbei möchte man ein, extrem dicht mit DOM's besiedeltes, Volumen implementieren, dass die Neutrino-Detektion ab wenigen GeV zulässt. Eine Veranschaulichung des Projekts ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

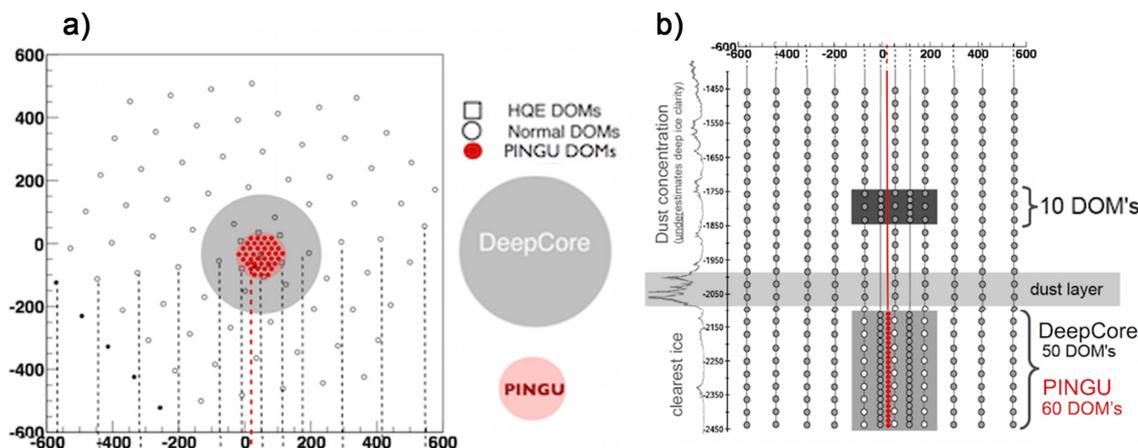


Abbildung 2.6: Das PINGU-Upgrade des IceCube Detektors. **a)** Hier sieht man das IceCube Array aus der Vogelperspektive mit dem extrem dichten **PINGU-Kern** (rot) und den Größenvergleich zwischen DeepCore und PINGU. **b)** Hier ist die Einteilung von IceCube von 1450m bis 2450m Tiefe, in seitlicher Perspektive, gezeigt. Außerdem sieht man die Platzierung von PINGU, in einer Tiefe von 2150m bis 2450m. Zusätzlich links daneben die Staubkonzentration im Eis als grafische Darstellung, die die Platzierung von PINGU, wegen der großen Reinheit des Eises in diesem Bereich, rechtfertigt [32].

Da das Eis in IceCube als Kalorimeter zur Neutrino Detektion genutzt wird, ist die genaue Kenntnis dessen Eigenschaften bzw. Reinheit wichtig. Messungen zeigten, dass sich das IceCube Eis annähernd in horizontale Schichten mit ähnlichen optischen Eigenschaften, wie Streu- und Absorptionslängen, unterteilen lässt, siehe Abb. 2.6b).

Durch Myonen sowie in situ Lichtquellen und Vergleiche der aufgezeichneten Daten verschiedener DOMs sind Absorption und Streuung in IceCube auf 10% genau bestimmt. Ziel von PINGU ist es, durch die dichtere Anordnung der DOMs, die Eigenschaften des Eises im PINGU Volumen auf 2-3% genau zu bestimmen. [48]

Motivation des PINGU ist die schon angesprochene Verifizierung einer der möglichen Neutrino-Massenhierarchien durch Präzisionsmessung des atmosphärischen Neutrinoflusses. Desweiteren sucht man damit nach dunkler Materie im Universum, sowie Astro- und Neutrinophysik jenseits des Standardmodells. [31]

Abschließend stellt sie das Hauptanwendungsgebiet für das entwickelte Precision Optical Calibration Module, kurz POCAM, dar. Hier soll das entwickelte optische Modul zur Verfeinerung der Detektion eingesetzt werden und somit maßgeblich zur Verbesserung des IceCube-Detektors, für niedrige Energien, beitragen. Im folgenden Kapitel soll diese Anwendung vorgestellt und die Realisierung des ersten Prototyps begleitet werden.

3 Das Precision Optical Calibration Module - Der erste Prototyp

Das Ziel des POCAM ist es, eine bekannte Lichtquelle in den PINGU-Kern des IceCube-Detektors einzulassen und damit die Detektion des IceCube Experiments, sowie dessen Energieauflösung, zu verbessern. Im Folgenden soll nun die Entwicklung des ersten Prototypen begleitet und die Auswahl der Komponenten erläutert werden.

3.1 Konzept und Motivation

Im Prinzip soll eine, sich selbst kalibrierende, isotrope Lichtquelle in PINGU platziert werden. Diese versorgt im besten Fall dessen gesamtes Eisvolumen durch einen *Flash* mit Licht. Flash bedeutet in diesem Zusammenhang ein kurzes, kontrolliertes Aufleuchten. Durch einen eingebauten Photomultiplier soll die genaue Photonenemission *in situ* gemessen werden. Durch diese *Selbst-Kalibrierung* ist die Abstrahlcharakteristik des POCAM, im idealen Fall, sehr genau bekannt. Durch nachvollziehen der resultierenden Daten der DOM's soll durch die bekannte Emission des POCAM, deren Detektion für niedrige Energien optimiert, die optischen Eigenschaften des Eises im Inneren von PINGU noch genauer bestimmt und damit dessen Energieauflösung noch weiter verbessert werden.

In Abbildung 3.1 sind die, aktuell in Betracht stehenden, Versionen des POCAM im sphärischen Querschnitt dargestellt.

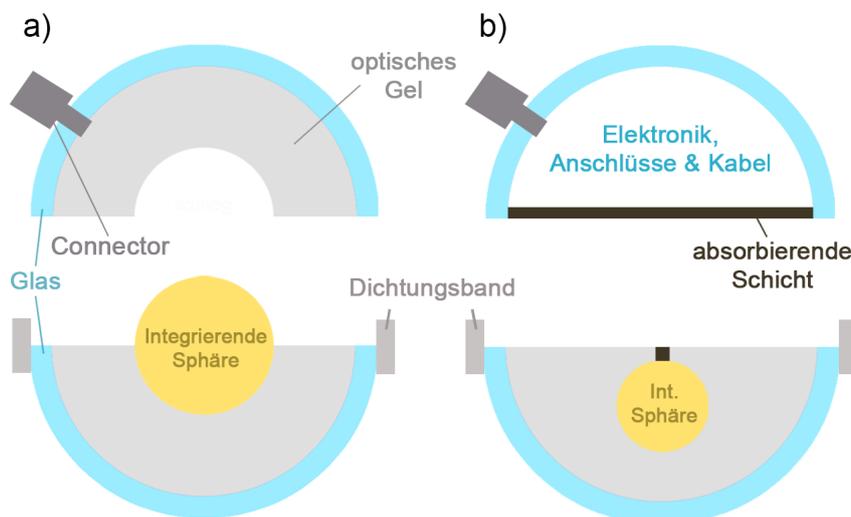


Abbildung 3.1: Mögliche POCAM Konfigurationen: **a)** die symmetrische Version mit Abstrahlung über die gesamte Sphäre und **b)** die alternative, asymmetrische Version mit Abstrahlung nur aus der unteren Hemisphäre, realisiert durch eine absorbierende Schicht. In beiden Versionen sieht man die **Integrierende Sphäre** (gelb) als Lichtquelle, das **optische Gel** (grau) und die **Glaskapsel** (blau), in der alles drucksicher verbaut ist. Außerdem den **Connector** (dunkelgrau) als elektrische Verbindung und das **Dichtungsband** (grau). Die Dimensionen wurden für die Illustration frei gewählt.

Im Folgenden soll nun der Bau des Prototypen der symmetrischen Konfiguration mit der Auswahl der Komponenten dokumentiert und erläutert werden.

3.2 Geant4 Simulation

Die Grundlage, um Anhaltspunkte für die Geometrien zu erhalten, in denen dann tatsächliche Tests vorgenommen werden sollen, ist die Simulation des Projekts mit Geant4. Dieses komplexe Simulationsprogramm wurde für die Untersuchung von Teilchenpropagation durch Materie entwickelt und ermöglicht das Testen verschiedener Geometrien und Materialparameter. Im Folgenden soll es kurz vorgestellt werden.

Ohne auf die komplexen, programmierten Inhalte einzugehen, wird in der Simulation eine beliebig große Anzahl Photonen erzeugt, die die LED, im Inneren des POCAM, verlassen. Sie verbringen eine gewisse, konfigurationsabhängige Zeit in der sogenannten *Integrierenden Sphäre*, auf deren Aufgaben und Arten in Abschnitt 3.4 detailliert eingegangen wird, und verlassen diese wieder. Nach durchlaufen des optischen Gels und der Glaskapsel wird dann in einem gewissen Abstand gemessen, aus welcher Richtung wieviele Photonen eingegangen sind. Die Daten werden dann mit einem sogenannten *Skyplot* visualisiert und geben Aufschluss über die Isotropie. Ein Beispiel ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

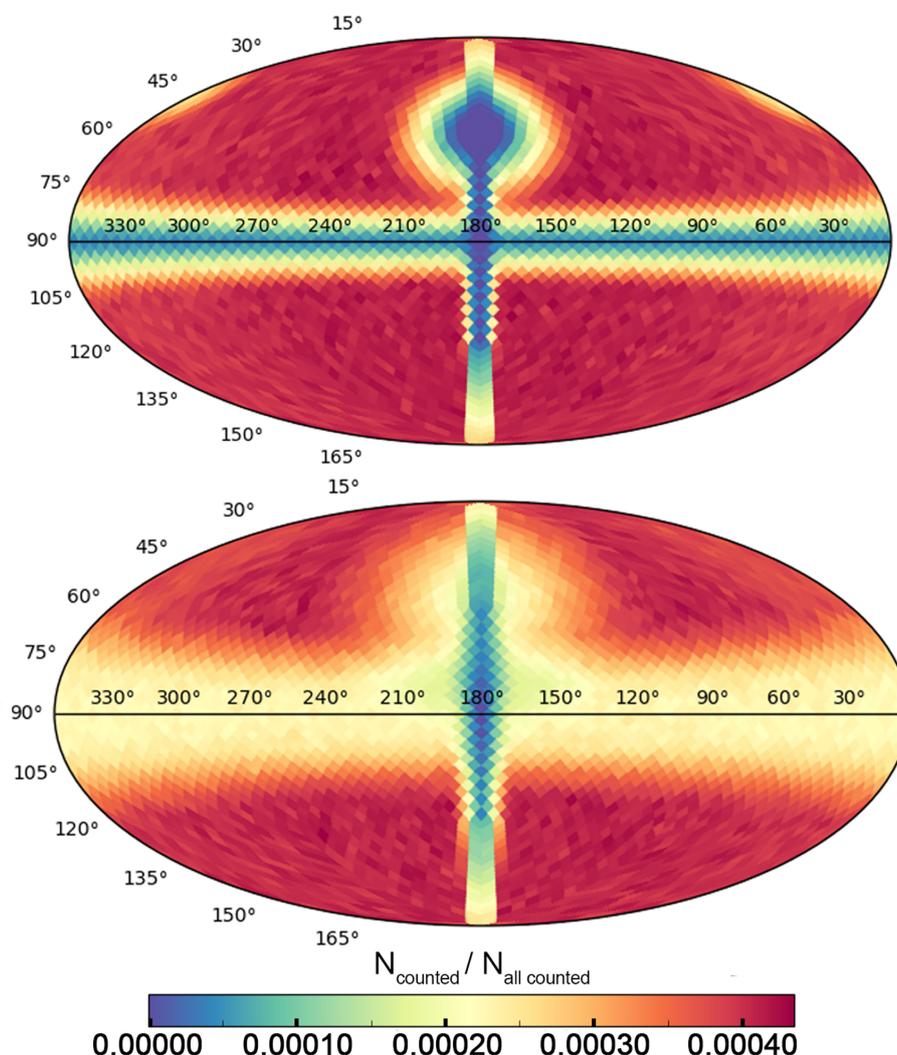


Abbildung 3.2: Zwei Skyplots aus der Geant4 Simulation mit 10^8 generierten Photonen und normiert auf die detektierte Gesamtanzahl. Beide Simulationen hatten gleiche Materialparameter, lediglich verschiedene Lichtquellen-Durchmesser mit 20mm (oben) und 50mm (unten). Man sieht in beiden Plots deutlich die verschieden großen und unterschiedlich diffusen Schatten des Connectors, des Kabels und des Dichtungsbands [34].

3.3 Elektronik

Um den POCAM einsatzbereit zu machen ist natürlich Elektronik notwendig. Im Folgenden soll diese kurz beschrieben und erläutert werden. Aufgrund der Komplexität wird allerdings auf Details verzichtet, da dies nicht im Fokus dieser Arbeit stehen soll.

Die Elektronik besteht aus:

- einem Micro-Controller zur Steuerung
- einem *Kapustinsky-Schaltkreis* [46] zur Erzeugung kurzer Lichtpulse
- einem Trigger zur Ansteuerung des Kapustinsky-Schaltkreises
- eine LED bzw. ein LED-Array im Bereich von 300 – 500nm
- einem Photomultiplier zur Selbstkalibrierung

Um ein reales Neutrino Ereignis zu imitieren, darf der Flash nur einige Nanosekunden dauern, dies soll mit dem erwähnten Kapustinsky-Schaltkreis realisiert werden.

Durch variieren der Komponenten dieses Schaltkreises wird im Moment untersucht, welche Konfiguration einen möglichst passenden Puls erzeugt. Die letztliche, optimale Konfiguration steht hierbei noch nicht fest. Auch LED, PMT, Trigger und Micro-Controller befinden sich aktuell in der Testphase. [35]

3.4 Integrierende Sphäre

Unabhängig von der Konfiguration des POCAM, ist die isotrope Lichtverteilung die Grundlage für dessen Erfolg. Diese soll mit einer sogenannten *integrierenden Sphäre* erreicht werden.

Diese integrierende Sphäre soll so aufgebaut sein, dass sie für Licht zwar teilweise durchlässig aber gleichzeitig diffus in alle Richtung reflektierend ist. Material dieser Art wird auch Lambert'scher Strahler genannt. Im Idealfall würde dann Licht aus einer LED im Inneren der Sphäre mehrmals diffus reflektiert bevor es diese schließlich verlassen kann.

Die Herausforderung besteht nun darin, diese Eigenschaften der diffusen Reflexion und der Transmissionswahrscheinlichkeit so abzustimmen, dass durch die sphärische Symmetrie eine isotrope Abstrahlung erreicht wird. Ein oft genutztes, diffusreflektierendes Material ist zum Beispiel optisches Teflon (PTFE), welches auch wegen seiner mechanischen Stabilität gut für diese Art von Applikation geeignet ist.

Zur Verwirklichung dieser Idee gab es mehrere Möglichkeiten. In Betracht gezogen wurden zum einen eine hochreflektive PTFE-Sphäre mit Löchern (Multi-Port Sphäre) und zum anderen eine semi-transparente PTFE-Sphäre. Beide Möglichkeiten sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

3.4.1 Multi-Port Sphäre

Die Verwirklichung einer *Multi-Port Sphäre* entspricht der ursprünglichen Idee. Die Sphäre selbst besteht hierbei aus einem annähernd vollständig und diffus reflektierendem Material mit mehreren Löchern, siehe Abbildung 3.3.

Das Photon, das von der LED emittiert wird, wird im Inneren der Sphäre mehrmals diffus reflektiert und verlässt diese schließlich durch eines der Löcher. Das Prinzip ist in Abbildung 3.4 veranschaulicht.

Grundgedanke ist hierbei, dass durch die mehrmalige, diffuse Reflexion und die sphärische Symmetrie, in jeden Raumwinkel eine ähnliche Anzahl von Photonen ausgesendet wird und somit eine möglichst isotrope Abstrahlung erreicht wird.

Offensichtlich wird die Abstrahlcharakteristik der Sphäre extrem durch die Eigenschaften des Materials, die Lochgeometrie sowie die Anzahl der Löcher beeinflusst. Aufgrund der leichteren Realisierung und der ähnlichen Simulationsergebnisse, wurde sich aber für eine *semi-transparente*, integrierende Sphäre entschieden. Diese wird im Folgenden erläutert.

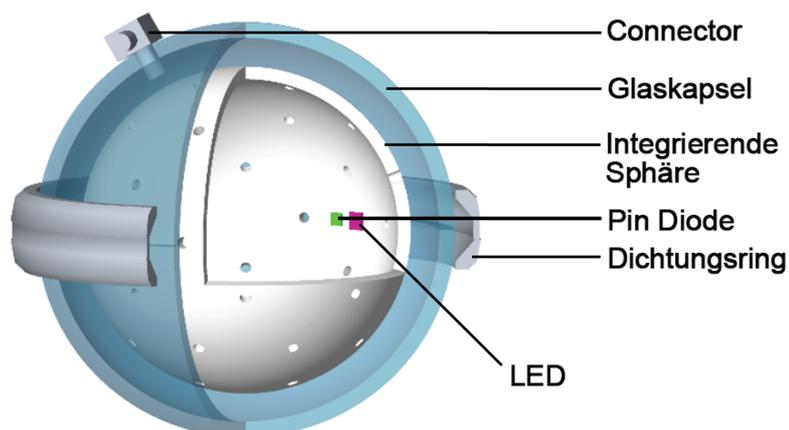


Abbildung 3.3: Illustration der Multi-Port Sphäre aus der Geant4 Simulation. Zu sehen ist die **LED** (lila), die **Pin Diode des PMT** (grün), die Integrierende Multi-Port Sphäre (weiß), die Glaskapsel (blau), das Dichtungsand (grau) und der Connector (grau), der die elektronische Verbindung ins Innere der Sphäre darstellt [33].

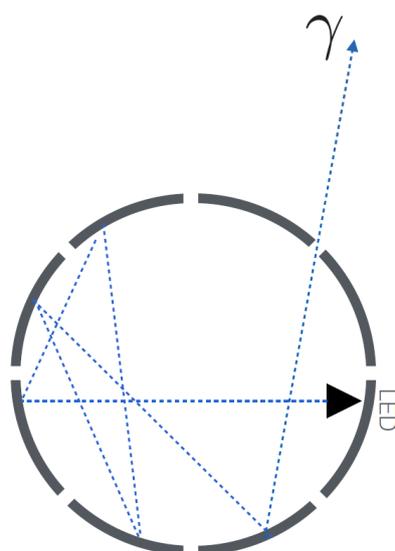


Abbildung 3.4: Beispielhafter Strahlengang eines Photons im Inneren der integrierenden Sphäre mit mehreren Öffnungen. Man sieht den **Strahlengang des Photons** (blau gestrichelt), das mehrmals diffus reflektiert wird, bevor es die Sphäre verlässt [33].

3.4.2 Semi-Transparente Sphäre

Bei dieser Variante werden die Eigenschaften des Materials genutzt, um eine isotrope Lichtabstrahlung zu erzielen. Für den Bau des Prototypen wird diese Variante verwendet.

Bei der *semi-transparenten Sphäre* soll nun die teilweise Transmission eines geeigneten Materials (z.B. optisches Teflon, kurz PTFE), dazu genutzt werden, ebenso diffus reflektierte Photonen aus dem Inneren isotrop zu emittieren.

Für gängige, optische Materialien lässt sich dies zum Beispiel leicht durch genügend dünne Schichtdicken realisieren. Bei sinkender Material-Dicke steigt der Grad der Transmission und mehr Photonen werden beim Auftreffen von Licht transmittiert.

Der Strahlengang ist ähnlich dem in Abbildung 3.4 mit dem Unterschied, dass Photonen die Sphäre nicht durch künstliche Löcher verlassen, sondern beim Treffen auf die Oberfläche mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (z.B. $\rho_{trans} \approx 1.5\%$ bei $d = 2\text{mm}$ für PTFE, siehe Abb. 3.5) transmittiert werden.

Zusammen mit der diffusen Reflexion erwartet man, ähnlich zur Multi-Port Sphäre, wegen der sphärischen Symmetrie eine isotrope Abstrahlung.

Natürlich hängt auch hier der Grad der Isotropie maßgeblich von den Parametern des Materials und der Geometrie ab. Außerdem ist zusätzlich noch die Absorption zu beachten, die bei größeren Schichtdicken eine nicht mehr zu vernachlässigende Rolle spielt. Eine intensive Studie verschiedener Konfigurationen ist daher nötig.

3.4.2.1 Material

Offensichtlich ist die Wahl des Materials der Integrierenden Sphäre maßgeblicher Bestandteil beim Bau des POCAM-Prototypen. Wegen der passenden optischen und mechanischen Eigenschaften wurde für die semi-transparente Sphäre optisches Teflon (PTFE) gewählt. Dessen Transmissivität und Reflektivität sind in Abbildung 3.5 illustriert.

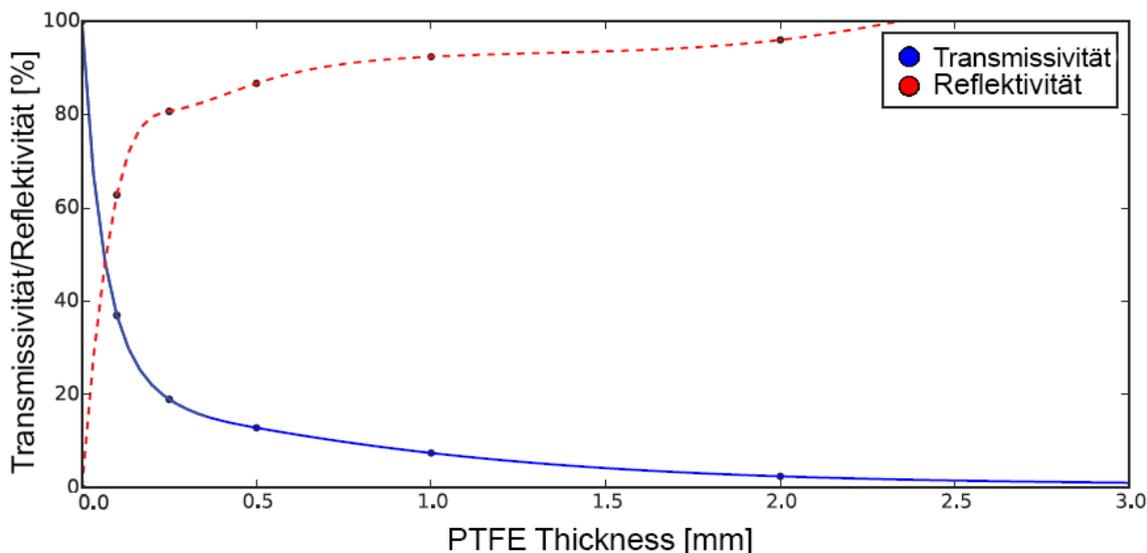


Abbildung 3.5: Transmissivität und Reflektivität von optischem Teflon (PTFE) in Abhängigkeit der Dicke [33].

Durch die Variierung der PTFE-Dicke kann man die Transmissionswahrscheinlichkeit sensibel einstellen und somit ihren Effekt auf die Isotropie und die zeitliche Abstrahlcharakteristik untersuchen. Außerdem sind Sphären aus PTFE einfacher und auch günstiger zu realisieren als die Multi-Port Variante oder Sphären aus anderen Materialien.

Letztlich sei hier noch, der Vollständigkeit halber, der Brechungsindex von PTFE erwähnt. Im sichtbaren Wellenlängen-Bereich ist dieser nahezu konstant und beträgt:

$$n_{\text{PTFE}} = 1.38 \quad (3.1)$$

3.4.2.2 Geometrie

Die finale Geometrie der Sphäre selbst ist noch Gegenstand aktueller Studien innerhalb der Forschungsgruppe und ist vor allem abhängig von der POCAM-Variante. Der eigentliche Prototyp soll entsprechend der ursprünglichen Idee (Konfiguration „a“) in Abb. 3.1 realisiert werden.

Hierfür werden verschiedene PTFE Schichtdicken und Sphären Durchmesser in Erwägung gezogen, die sich aufgrund von den angesprochenen Eigenschaften des optischen Teflons, den Simulationen und den Geometrien der Elektronik ergeben haben. Die momentan in bevorzugten Parameterbereiche sind:

$$\text{Sphären Durchmesser} \quad D_{\text{Sphäre}} \in [20\text{mm}, 60\text{mm}] \quad (3.2)$$

$$\text{PTFE Dicke} \quad d_{\text{PTFE}} \in [0.5\text{mm}, 3\text{mm}] \quad (3.3)$$

Die Dicke der Sphäre ist entscheidend für deren Transmissivität, wird aber begrenzt durch die technische Genauigkeit. Ganz besonders entscheidend ist hierbei offensichtlich die Homogenität der Dicke, welche wegen der technischen Möglichkeiten, eine untere Grenze setzt. Außerdem würden sehr dünne Sphären mechanisch instabil werden was zum Beispiel den Transport sehr schwierig gestalten könnte.

Die obere Grenze ist offensichtlich durch Reflexion und Absorption des optischen Teflons gegeben, da man bei einer semi-transparenten Sphäre auf die Transmission angewiesen ist.

Die Sphären Durchmesser sind das Ergebnis einer Vielzahl von Simulationen. Im ersten Moment wäre eine infinitesimale Lichtquelle ideal, da sie scharf definierte Schatten von eventuellen Störfaktoren wie Kabeln, Dichtungsband oder Ähnlichem zur Folge hätte, in Übereinstimmung mit Abbildung 3.2.

Nach unten ist der Sphärendurchmesser deshalb begrenzt, da zu kleine Sphären keine isotrope Abstrahlung zur Folge hätten. Hierbei würden die Photonen die Sphäre zu schnell wieder verlassen und es würde daher keine isotrope Verteilung der Photonen erreicht.

Allerdings dürfen sich die Photonen auch nicht zu lange darin aufhalten, da nach wie vor ein Flash in PINGU erzeugt werden soll. Die Photonemission soll also nur einige Nanosekunden dauern. Durch dieses gewünschte Zeitprofil ist eine obere Grenze des Durchmessers festgelegt, da größere Sphären auch längeren Zeiten entsprechen, die die Photonen von Reflexion zu Reflexion benötigen.

Ein harmonischer Zustand mit genügend kleinem Zeitprofil aber genügend hoher Isotropie ist Ziel der Studien aller entschiedenen Parameter mithilfe der Simulation. Durch die experimentelle Messung der simulierten Konfigurationen soll dies überprüft und im idealen Fall bestätigt werden.

Ein erster Prototyp solch einer semi-transparenten PTFE-Sphäre wurde innerhalb der TU München hergestellt. Ein Originalbild ist in Abbildung 3.6 gezeigt.

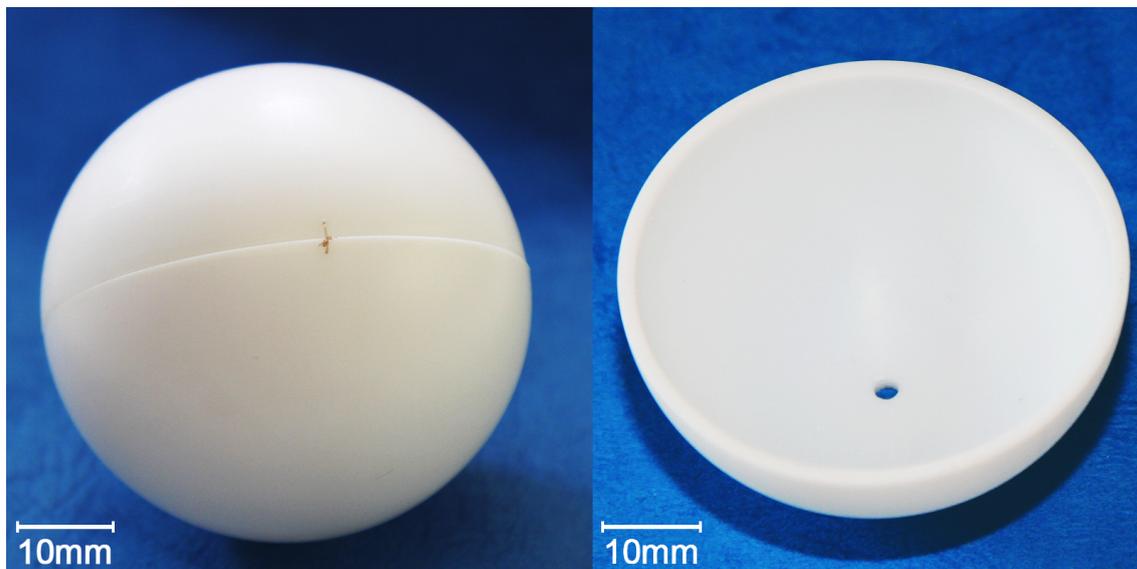


Abbildung 3.6: Integrierende Sphäre aus optischem Teflon mit einem Durchmesser von 50mm und einer Dicke von 2mm. Hergestellt von der Werkstatt der TU München. Links sieht man die komplette, integrierende Sphäre aus den, mit dünnen Drähten verbundenen, Hemisphären. Rechts ist sie geöffnet und man sieht die Bohrung für die LED. In beiden Fällen ist links unten der Maßstab angegeben [44].

3.4.3 Ergebnis

Kurz zusammengefasst, wurde eine semi-transparente Sphäre aus optischem Teflon, kurz PTFE, gewählt, da dieses Material passende optische und mechanische Eigenschaften vereint.

Optische Messungen werden mit den PTFE-Sphärengeometrien gemäß (3.2) und (3.3) durchgeführt. Wobei mehrere Möglichkeiten aus Dicke und Durchmesser für die experimentellen Messungen realisiert werden um die ideale Konfiguration zu finden. Hierfür muss außerdem noch eine Firma gefunden werden, die in der Lage ist die verschiedenen Konfigurationen herzustellen.

Aufgrund der vielversprechenden Simulationsergebnisse erwartet man sich, unter all diesen möglichen Konfigurationen, mindestens eine, die einer isotropen Abstrahlung sehr nah kommt und gleichzeitig ein passendes Zeitprofil aufweist, um so eine statistisch signifikante Selbst-Kalibrierung zu ermöglichen.

Die besten Resultate der Simulation, hinsichtlich Isotropie und Zeitprofil, erzielte die Geometrie:

$$D_{\text{Sphäre}} = 50\text{mm} \quad \text{und} \quad d_{\text{PTFE}} = 2\text{mm} \quad (3.4)$$

Dies muss jedoch nun noch durch empirische, optische Messungen getestet werden.

Mit der Wahl der Lichtquelle des POCAM ist die wichtigste Komponente gefunden und muss nun noch, durch Anpassen der Geometrie- und Materialparameter, optimiert werden. Im Folgenden werden nun die Aufgaben der weiteren Komponenten erläutert und ihre Auswahl begründet.

3.5 Optisches Gel

Wie schon anfangs kurz angedeutet, soll das Innere des POCAM eventuell mit einem optischen Gel gefüllt werden. Dieses Gel soll die optische Verbindung der integrierenden Sphäre, also der Lichtquelle, und der drucksicheren Glassphäre herstellen.

Optische Gele sind meist zwei-komponentige Gele aus Silikon die nach dem Vermischen mehr oder weniger stark aushärten. Optisch deshalb, weil sie im sichtbaren Wellenlängenbereich hochtransparent sind. Mit spezielleren Gelen kann man auch hohe Transparenz im nahen UV- und Infrarotbereich erzielen.

Im Folgenden soll nun zuerst auf die Gründe für eine Gel-Nutzung eingegangen werden und dann die Eigenschaften der Gele und ihre Effekte auf die Optik des POCAM erläutert werden.

3.5.1 Gründe für die Nutzung

Die Frage bleibt bestehen, warum die Glassphäre nicht einfach evakuiert wird und der abgedichtete POCAM dann in IceCube abgelassen wird. Dies hat unter anderem mechanische Gründe, die im folgenden kurz erläutert werden sollen.

Zum einen kann nie vollständig evakuiert werden, das heißt es bleibt immer ein bisschen Restluft in der abgedichteten Glaskapsel. Senkt man diese nun in das unter -30°C kalte IceCube-Innere, würde diese Luft kondensieren und sich an der Glaskapsel niederschlagen. Dies würde offensichtlich, die vorher akribisch genau bestimmte Abstrahlcharakteristik verfälschen und eine präzise Kalibrierung von PINGU wäre unmöglich. Das Gel würde den Innenraum der Glaskapsel komplett ausfüllen und ein Evakuieren wäre eventuell gar nicht mehr nötig.

Desweiteren, muss auch die Integrierende Sphäre mithilfe einer Halterung genau mittig im POCAM platziert und vor allem gehalten werden. Diese Halterung sollte filigran sein, um möglichst wenig Schatten zu werfen. Gleichzeitig, muss sie die Integrierende Sphäre aber präzise an ihrer Position halten, da davon die komplette Abstrahlcharakteristik abhängt. Hier würde das Gel zusätzlich, zur filigranen Halterung, eine mechanische Stütze darstellen, die, zusammen mit der Halterung, die Sphäre an ihrem Platz hält. Zum Beispiel beim Transport könnte es passieren, dass sich die alleinige Halterung, durch Stöße oder Ähnliches, verschiebt oder sogar bricht. Mit eingefülltem Gel allerdings, schafft man eine stützende und sogar dämpfende Umgebung, die zusammen mit der Halterung die präzise Platzierung der Integrierenden Sphäre gewährleistet und zusätzlich noch einen Schutz für den Transport darstellt.

Es wurde sich aufgrund dieser wichtigen, mechanischen Eigenschaften zunächst für die Nutzung eines Gels entschieden. Sollte das Gel allerdings zu starken, negativen Einfluss auf die Optik haben oder andere mechanische Komplikationen nach sich ziehen, könnte sich auch nachträglich noch dagegen entschieden werden.

Im Folgenden werden nun die Eigenschaften des Gels hinsichtlich der Eignung für eine Anwendung im POCAM untersucht. Dabei sollen die Effekte auf die Abstrahlcharakteristik und die erwähnten, mechanischen Eigenschaften im Vordergrund stehen.

3.5.2 Auswahlkriterien

Bevor man sich konkret mit der Auswahl eines optischen Gels beschäftigen kann, muss geklärt werden, welche Eigenschaften die Gele mit sich bringen und vor allem welche davon für die Anwendung im POCAM geeignet sind.

Mit dem Gel soll das Innere des POCAM gefüllt werden. Damit soll dann das Licht von der Integrierenden Sphäre zum Glas geleitet werden. Im ersten Moment sind also die optischen Eigenschaften des Gels entscheidend. Dazu gehören:

- Transmissivität
- Absorption
- Brechungsindex
- Streuung

Allerdings ist jetzt klar, dass auch mechanische Faktoren zu beachten sind. Diese bestimmen, ob ein Gel für die Anwendung im POCAM geeignet ist oder nicht. Hierbei sind zu beachten:

- Einsatzfähiger Temperaturbereich
- Konsistenz
- Adhäsion

All dies ist bei der Auswahl eines optischen Gels zu beachten, um sicherzugehen, dass es für die Anwendung im POCAM geeignet ist.

Im Folgenden sollen nun die wichtigsten Ergebnisse für das optische Gel und seine Eigenschaften herausgearbeitet und erläutert werden.

3.5.3 Transmissivität

Die *Transmissivität* des Gels, also die Lichtdurchlässigkeit, ist Grundvoraussetzung für die Anwendung im POCAM. Für optische Gele gehört dies zum Standardrepertoire, es muss allerdings auf den Grad der Transmission und den Wellenlängenbereich geachtet werden. Das Gel darf also zum einen nicht trüb sein, sondern muss transparent und klar sein. Zum anderen soll es, zusätzlich zum sichtbaren Bereich, auch schon für niedrigere Wellenlängen ab

$$\lambda_{\text{trans}} \geq 350\text{nm} \quad (3.5)$$

hochtransmissiv sein, da in IceCube auch hochenergetische Strahlung präzise detektiert werden soll. Die bei den Neutrino-Interaktionen entstehenden Photonen haben aber meist Wellenlängen, die nicht größer sind als 500nm. Die wichtige Eigenschaft des Gels ist daher eine hohe Transmissivität im niedrigen Wellenlängenbereich.

Wegen der Anwendung in IceCube-Gen2 bedeutet das für das optische Gel:

Das Gel muss für Wellenlängen von **350nm – 500nm hochtransmissiv** sein.

Das typische Transmissionsspektrum eines optischen Silikon-Gels ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Hier sieht man, die hohe Transmissivität im sichtbaren Bereich. Allerdings fällt auch auf, dass diese bei herkömmlichen optischen Gelen erst ab 400nm zufriedenstellend hoch ist. Man muss bei der Auswahl also darauf achten, welcher Wellenlängenbereich für die konkrete Anwendung gebraucht wird.

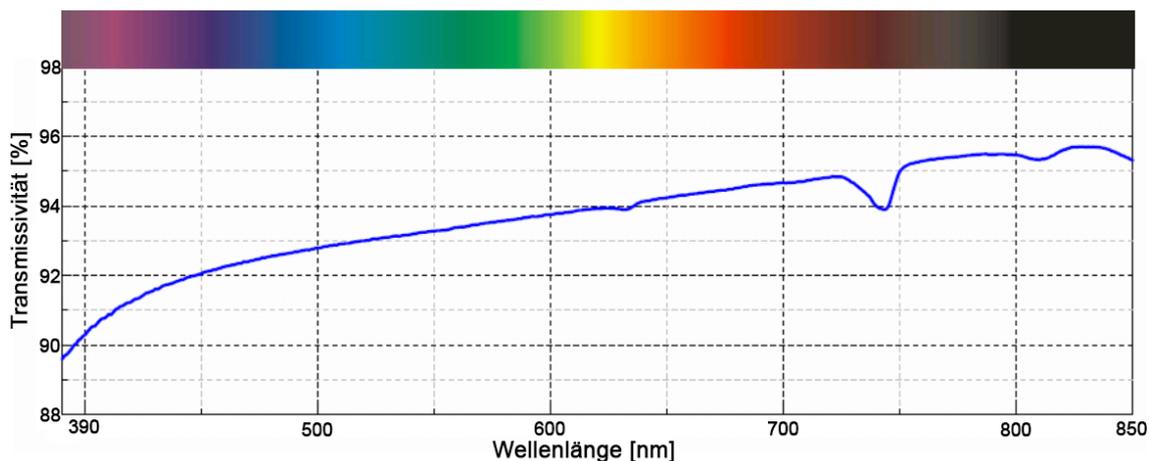


Abbildung 3.7: Die optische Transmissivität des optischen Silikon-Gels QSil 216, für einen Lichtweg von 10mm. Zu sehen ist die Transmissivität in Prozent für den sichtbaren Wellenlängenbereich von 390nm bis 850nm. Man sieht deutlich den konstant hohen Transmissionsgrad von über 90%, was eine niedrige Absorption, bei kurzen Strecken, impliziert. Allerdings ist auch die stark sinkende Tendenz der Transmissivität unter 390nm ersichtlich. Ohne weitere Untersuchung des Bereichs ab 350nm, könnte man noch keine Aussage über die Eignung im POCAM machen [37].

3.5.4 Absorption

Bei transparenten, optischen Gelen spielt die *Absorption* auf kurzen Strecken zwar meist eine kleine, aber eventuell eine wichtige Rolle.

Die Wegstrecken, die Licht im POCAM, durch das Gel, zurücklegen muss, sind einige Zentimeter lang. Auf solchen, kurzen Strecken wird, wegen der Transparenz, eine hohe Transmissivität (typischerweise $> 90\%/cm$) für den sichtbaren Bereich erzielt. Wegen der sensiblen, optischen Anwendung des POCAM ist genaue Kenntnis der Absorptionseigenschaften eines Gels dennoch zwingend notwendig.

Die Effektivität des POCAM Flashes hängt auch maßgeblich von dessen Intensität ab. Nur ein ausreichend intensiver Flash kann weit genug in PINGU propagieren, um genug DOM's zu erreichen und so eine statistisch signifikante Kalibrierung zu ermöglichen.

Bei der Auswahl eines Gels muss also darauf geachtet werden, dass beim Durchlaufen des Gels nicht zu viel Intensität durch Absorption verloren geht. Daher sollte entweder die Absorption für die benötigte Strecke im vornherein bekannt sein oder aber ein Gel mit möglichst niedriger Absorption pro Strecke gewählt werden, um dann die Verluste experimentelle zu untersuchen.

Für das Gel des Prototypen muss daher beachtet werden:

Für Strecken von einigen Zentimetern sollte **möglichst wenig Absorption** auftreten.

Im konkreten Fall muss dies natürlich für das, in Erwägung gezogene, Gel überprüft werden, um eine hinreichende Intensität des Flashes zu gewährleisten.

3.5.5 Brechungsindex

Wegen der optischen Anwendung des POCAM ist der Einfluss des Brechungsindex des optischen Gels maßgeblich. Im Folgenden soll nun dessen Auswirkung auf die Abstrahlcharakteristik und die Optik des POCAM untersucht und erläutert werden.

Die Brechungsindizes von gängigen, optischen Gelen liegen im Bereich von:

$$n_{\text{Gel}} \in [1.4, 1.5] \quad (3.6)$$

Gele mit niedrigeren oder höheren Brechungsindizes sind dagegen sehr schwer erhältlich und extrem teuer.

Aus optischer Sicht hat der Brechungsindex des Gels Auswirkung auf die Brechung bei den Übergängen

$$\text{Integrierende Sphäre (PTFE)} \longrightarrow \text{Optisches Gel} \quad (3.7)$$

$$\text{Optisches Gel} \longrightarrow \text{Glas} \quad (3.8)$$

auf die Reflexion an deren Grenzflächen und auch auf die Absorption im Gel.

Nun soll der Lauf des Lichts nachvollzogen werden. Dafür wird im gesamten Abschnitt auf komplizierte Winkelabhängigkeiten und Ähnliches verzichtet. Es soll nur qualitativ skizziert werden, welchen Effekt der Brechungsindex des Gels auf die Isotropie, den Strahlengang und die Schatten hat. Außerdem soll angenommen werden, dass die integrierenden Sphäre eine vollständig isotrope Abstrahlung aufweist.

3.5.5.1 Isotropie & Lichtbrechung

Zunächst soll qualitativ die Lichtbrechung untersucht werden und die Auswirkung verschiedener Brechungsindizes des optischen Gels hergeleitet werden.

Um die Effekte nachvollziehen zu können, benötigt man außerdem den Brechungsindex der Glaskapsel und den des Eises. Hier sei angemerkt, dass die Glaskapsel in Abschnitt 3.6 noch detailliert besprochen wird, hier sei nur ihr Brechungsindex erwähnt. Der Brechungsindex des Eises in IceCube variiert etwas, je nach Verschmutzung des Eises im Inneren. Für die folgenden Betrachtungen reichen folgende Werte als Näherung für den sichtbaren Wellenlängen-Bereich :

$$n_{\text{Glas}} \approx 1.5 \quad \text{und} \quad n_{\text{Eis}} \approx 1.3 \quad (3.9)$$

Wenn Licht aus einem Medium n_1 auf eine Grenzfläche zu einem Medium n_2 trifft, verhält sich der Ausfallswinkel in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, zum Lot der Grenzfläche, wie:

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta_1 \quad (3.10)$$

mit dem Einfallswinkel θ_1 und dem Ausfallswinkel θ_2 . Diesen Zusammenhang nennt man in der Optik auch das *Snellius'sche Brechungsgesetz*.

Um nur qualitative Aussagen machen zu müssen kann man dies zu folgender Aussage vereinfachen:

Vom $\left\{ \begin{array}{l} \text{optisch dünneren ins dichtere} \\ \text{optisch dichteren ins dünnere} \end{array} \right\}$ Medium, wird $\left\{ \begin{array}{l} \text{zum Lot hin} \\ \text{vom Lot weg} \end{array} \right\}$ gebrochen.

Jetzt soll dem Verlauf des Lichts, wie in Abbildung 3.8 illustriert, gefolgt werden. Dabei sollen die Effekte des Brechungsindex auf die Optik nachvollzogen werden.

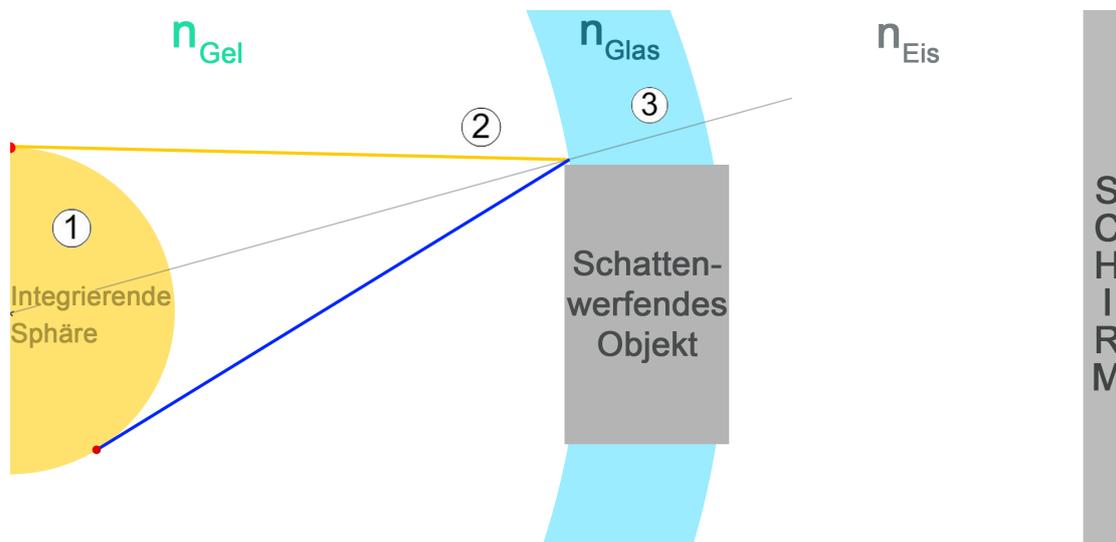


Abbildung 3.8: Ein beispielhafter Strahlengang im POCAM mit den beiden Grenzflächen Gel/Glas und Glas/Eis. Zu sehen ist die integrierende Sphäre, die Glaskapsel, ein schattenwerfendes Objekt (z.B. Dichtungsband) und ein Schirm in einiger Entfernung. Zusätzlich sind die Strahlen vom nördlichsten und südlichsten Punkt der integrierenden Sphäre, die beide im oberen Punkt des schattenwerfenden Objekts eintreffen, eingezeichnet. Außerdem die wichtigen Bereiche: **1**) Isotrope Emission aus der integrierenden Sphäre und Propagation durch das Gel dann **2**) Übergang von Gel zu Glas und **3**) Propagation durch das Glas mit Übergang ins Eis. Letzlich noch das Lot an die innere Grenzfläche im Punkt wo beide Strahlen darauf treffen und die Kennzeichnung der Bereiche oben, durch ihre jeweiligen Brechungsindizes.

1. *Das Licht verlässt die integrierende Sphäre isotrop, tritt ins Gel ein und durchläuft es*

Die Isotropie wird beim Eintritt ins Gel wegen der sphärischen Symmetrie nicht beeinträchtigt und weitergetragen. Streuungseffekte beim Durchlaufen des Gels sind im idealen Fall klein und sphärisch symmetrisch und haben so keinen negativen Einfluss auf die Isotropie. In Abschnitt 3.5.6 wird dieser Aspekt nochmal betrachtet.

Die Vernachlässigung der Absorption im Gel wurde bereits durch die materialspezifischen Eigenschaften des optischen Gels begründet. Reflexionseffekte sind wegen der hohen Reflektivität des optischen Teflons vernachlässigbar.

Wegen der sphärischen Symmetrie erwartet man zudem den Ausgleich eventuell auftretender Unregelmäßigkeiten beim Treffen auf die Grenzfläche unter verschiedenen Winkeln. Das von der integrierenden Sphäre ausgesendete Licht ist außerdem unpolarisiert und nicht kohärent. Interferenzerscheinungen müssen daher generell nicht berücksichtigt werden.

2. Das Licht trifft auf die Grenzfläche Gel/Glas.

An der Grenzfläche Gel/Glas hängt die Brechung des Lichts maßgeblich von den relativen Brechungsindizes der beiden Medien ab. Auch hier bleibt aber die Isotropie im Idealfall, wegen der sphärischen Symmetrie, erhalten. Da der Glasbrechungsindex schon durch (3.9) festgelegt ist, bleiben folgende Möglichkeiten:

$$\begin{aligned} n_{Gel} &< n_{Glas} \\ n_{Gel} &> n_{Glas} \\ n_{Gel} &= n_{Glas} \end{aligned}$$

Das bedeutet konkret, dass die Brechung an dieser Grenzfläche vom Brechungsindex des Gels abhängt. Aus den Folgerungen des Brechungsgesetzes ergibt sich:

$$\text{Für } \begin{cases} n_{Gel} < n_{Glas} \\ n_{Gel} > n_{Glas} \\ n_{Gel} = n_{Glas} \end{cases} \text{ wird der Strahl } \begin{cases} \text{relativ zum Lot hin} \\ \text{relativ vom Lot weg} \\ \text{nicht} \end{cases} \text{ gebrochen.}$$

An der Grenzfläche tritt Reflexion auf, die aber im Vergleich zu einer Vakuum/Glas-Grenzfläche abgeschwächt ist. Aus den *Fresnel'schen Formeln*, folgt für den Reflexionsgrad R , bei senkrechtem Einfall, für ein Gel mit Brechungsindex $n = 1.4$ beispielsweise:

$$R = \left(\frac{n - n_{Glas}}{n + n_{Glas}} \right)^2 \approx \begin{cases} 3.6 \cdot 10^{-2} & \text{für } n = 1.0 \\ 4.3 \cdot 10^{-4} & \text{für } n = 1.4 \end{cases} \quad (3.11)$$

Die Reflexion ist also im Vergleich zum Vakuum deutlich abgeschwächt, was einen weiteren Vorteil des Gels darstellt.

3. Das Licht durchläuft die Glasschicht und trifft auf die Grenzfläche Glas/Eis

Da die Glasschicht nur einige Millimeter dick ist, siehe hierzu später Abschnitt 3.6, ist die Absorption hier ebenfalls nur ein kleiner Beitrag.

Beim Treffen auf die Grenzfläche Glas/Eis, wird das Licht analog zu den vorigen Überlegungen gebrochen. Es ergibt sich:

Da $n_{Glas} > n_{Eis}$ wird der Strahl relativ vom Lot weggebrochen.

Die erste wichtige Erkenntnis hierbei ist, dass die Isotropie eines idealen POCAM (d.h. ohne jegliche Schatten) näherungsweise durch alle Grenzschichten weiter nach außen getragen wird. Lediglich Schatten und Streuung im Gel können darauf Einfluss haben, diese werden in den Abschnitten 3.5.5.2 und 3.5.6 näher betrachtet. Außerdem wird angenommen, dass sich alle kleinen Unregelmäßigkeiten, durch eventuelle Reflexionseffekte, wegen der sphärischen Symmetrie relativieren.

Es wird noch einmal festgehalten:

Die Isotropie ist im idealen Fall **unabhängig** vom Brechungsindex des Gels.

3.5.5.2 Schatten

Da die Isotropie näherungsweise durch alle Grenzschichten weitergetragen wird sind Schatten die Effekte, die eine effektive Minderung der Isotropie in einzelnen Bereichen verursachen können. Die Größe der Schatten wird stark durch den Brechungsindex des Gels beeinflusst. Ziel ist es nicht nur die Schattengröße zu minimieren, sondern auch möglichst definierte Schattenränder zu erhalten.

Es soll nun Licht betrachtet werden, das, wegen der Isotropie der integrierenden Sphäre, in gleichem Maße vom nördlichsten und südlichsten Punkt der integrierenden Sphäre auf den Rand eines Objekts trifft. Durch diese beiden extremalen Anteile wird der ideale Vollschatten (kein Licht) und der Halbschatten (teilweise Licht) definiert. Illustriert ist die Überlegung in Abbildung 3.9.

Im Folgenden soll nun der Effekt des Brechungsindex des Gels auf die Schattengrößen untersucht werden.

$n_{Gel} < n_{Glas}$:

Die Brechung an der Grenzfläche Gel/Glas erfolgt hin zum Lot, die Brechung an der Glas/Eis-Grenzfläche weg vom Lot. Aus den vorangegangenen Überlegungen folgt, dass:

$$\text{Für } \left\{ \begin{array}{l} n_{Gel} < n_{Eis} \\ n_{Gel} > n_{Eis} \\ n_{Gel} = n_{Eis} \end{array} \right\} \text{ wird ins Glas } \left\{ \begin{array}{l} \text{stärker} \\ \text{schwächer} \\ \text{gleich stark} \end{array} \right\} \text{ hin zum Lot gebrochen,}$$

wie aus dem Glas heraus, weg vom Lot.

Nimmt man nun den Fall $n_{Gel} = n_{Eis}$ als Bezugspunkt für die Schattengröße, folgt dass sich die Halb- und Vollschattengröße, im Vergleich dazu, in den beiden anderen Fällen verändern. Mit den vorigen Überlegungen heißt das:

$$\text{Halbschatten wird } \left\{ \begin{array}{l} \text{kleiner} \\ \text{größer} \\ - \end{array} \right\}; \quad \text{Vollschatten wird } \left\{ \begin{array}{l} \text{größer} \\ \text{kleiner} \\ - \end{array} \right\}$$

Wie schon erwähnt ist für die Anwendung des POCAM die genau bekannte Abstrahlcharakteristik entscheidend. Wegen der Komplexität der Optik sind diffuse Schatten schwieriger zu handhaben und der Fall $n_{Gel} < n_{Eis}$ stellt die beste Lösung dar. Hierbei nähern sich Halb- und Vollschattengröße aneinander an, der Schatten wird definierter.

$n_{Gel} > n_{Glas}$ & $n_{Gel} = n_{Glas}$:

Analog zum ersten Fall, machen wir die gleichen Überlegungen. Nun bleibt aber, wegen $n_{Glas} \approx 1.5$ und $n_{Eis} \approx 1.3$, in beiden Fällen nur noch die Möglichkeit $n_{Gel} > n_{Eis}$ übrig. Mit den gleichen Überlegungen folgt:

Für $n_{Gel} > n_{Eis}$ wird beide Male weg vom Lot gebrochen.

Durch zweimalige Brechung weg vom Lot wird zwar der Vollschatten kleiner, aber der diffuse Halbschatten deutlich größer, als im Vergleich zum Bezugspunkt der Schattengrößen $n_{Gel} = n_{Glas}$, der Schatten wird also diffuser.

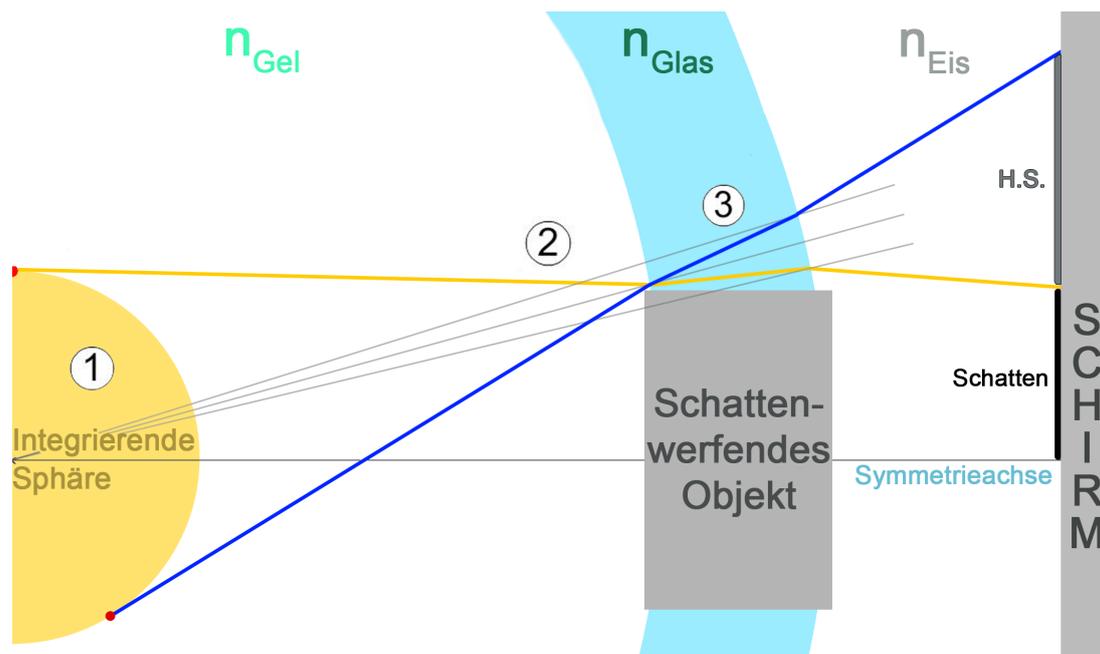


Abbildung 3.9: Ein modifizierter Strahlengang des POCAM durch Gel, Glas und Eis. Zu sehen ist die integrierende Sphäre, die Glaskapsel, ein schattenwerfendes Objekt und ein Schirm in der Entfernung. Zusätzlich sind die Strahlen vom nördlichsten und südlichsten Punkt der integrierenden Sphäre, die beide im oberen Punkt des schattenwerfenden Objekts eintreffen, eingezeichnet. Außerdem die wichtigen Bereiche: **1)** Isotrope Emission aus der integrierenden Sphäre und Propagation durch das Gel dann **2)** Übergang von Gel zu Glas und **3)** Propagation durch das Glas mit Übergang ins Eis. Hier sieht man nun die beispielhafte Brechung für den Fall $n_{Eis} < n_{Gel} < n_{Glas}$, mit den Loten auf die Grenzflächen. Man sieht deutlich den erzeugten, diffusen Halbschatten (H.S.) und den eigentlichen Schatten, sowie den Effekt der Brechung auf deren Größe.

Aus all den gemachten Überlegungen kann folgende Information, in Bezug auf die Schatten, extrahiert werden:

Auf die Größe der Schatten hat der Brechungsindex maßgebliche Konsequenzen. Je mehr sich der Brechungsindex des Gels von $n = 1.0$ unterscheidet, desto diffuser (und damit großflächiger) werden die resultierenden Schatten.

Da eine genau bekannte Abstrahlcharakteristik von entscheidender Bedeutung für den POCAM ist, sollten die entstehenden Schatten von Störfaktoren wie zum Beispiel dem Dichtungsband so definiert wie möglich sein. Denn dann können sie mit wenig Aufwand aus den späteren Berechnungen ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend bedeutet das:

Je **kleiner** der Brechungsindex des Gels, desto **definiierter** die Schatten.

Um dies zu überprüfen, wurden die verschiedenen Szenarien mit Geant4 simuliert und analysiert. Die resultierenden Skyplots sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Sie unterstützen und bestätigen die hier erzielten Resultate.

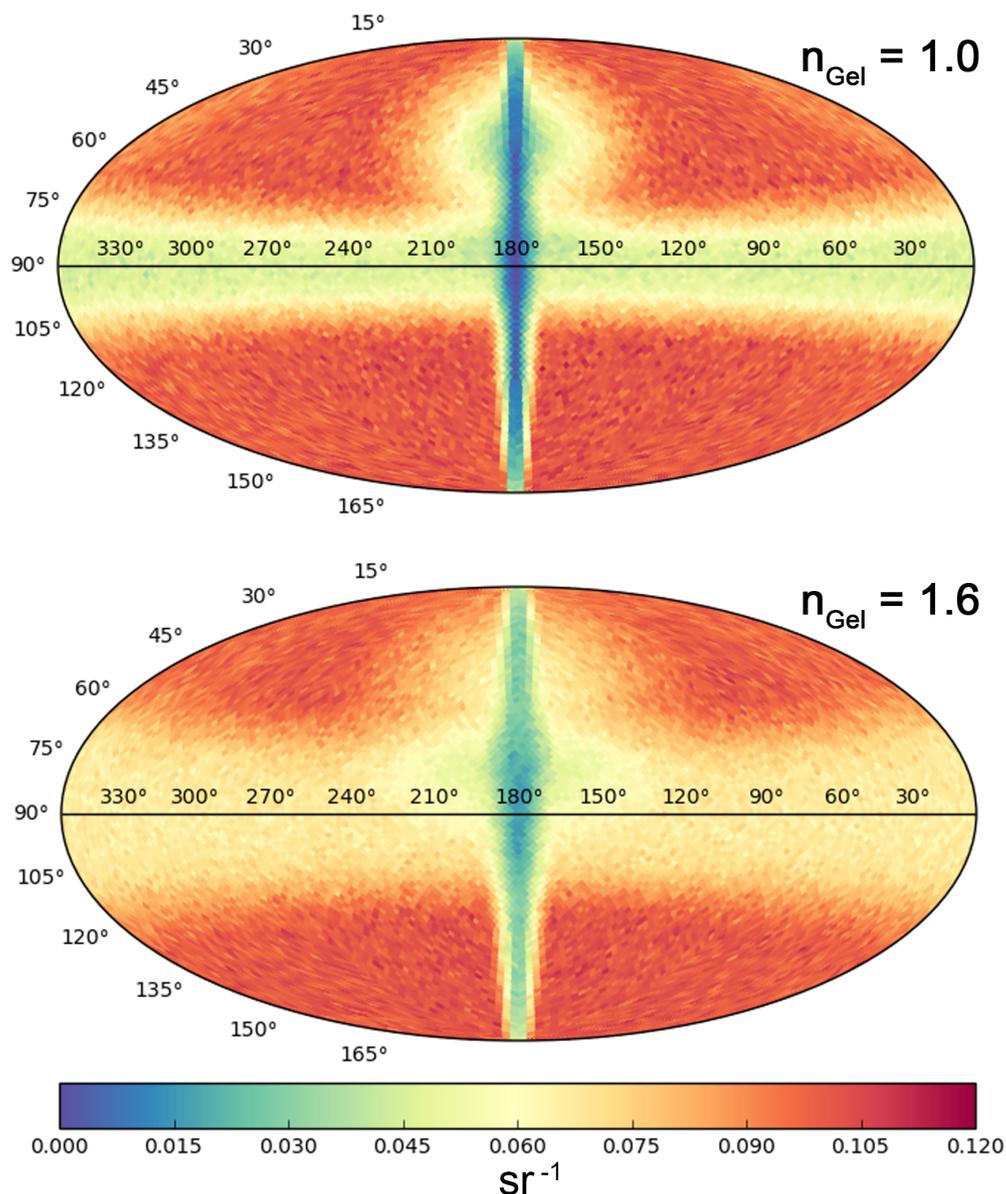


Abbildung 3.10: Skyplots aus simulierten Daten von Geant4 für die Brechungsindizes $n_{Gel} = 1.0$ (oben) und $n_{Gel} = 1.6$ (unten) des optischen Gels, einem integrierenden Sphären-Durchmesser von 50mm und sonst identischen Parametern. Es wurden 10^8 Photonen simuliert und anschließend auf Steradian normiert. Man sieht, wie erwartet, die deutlich diffuseren und größeren Schatten bei höherem Brechungsindex. Die endliche Größe des Schattens bei $n = 1.0$ ist bedingt durch die Geometrie der integrierenden Sphäre [34].

3.5.6 Streuung

Optische Gele, die Aushärten, werden üblicherweise durch Vermischen zweier Komponenten erzeugt. Das Licht kann beim Durchlaufen des Gels durch verschiedene Prozesse gestreut werden, zum einen an eingemischten Fremdkörpern wie Luftblasen, Staub oder Ähnlichem. Zum anderen kann auch Rayleigh-Streuung an den Gel-Molekülen auftreten.

Der Effekt von unregelmäßigen Luftblasen oder Partikeln für die Isotropie, liegt auf der Hand. Hier könnten durch die unregelmäßige Streuung Defizite in der isotropen Abstrahlung entstehen.

Diese Faktoren können jedoch minimiert werden. Durch Arbeiten im Reinraum wird eine Verschmutzung durch Staub und Ähnliches verhindert. Kurzzeitiges Evakuieren nach dem Mischvorgang kann Luft aus dem Inneren des Gels entfernen. Hier muss untersucht werden, welche Evakuierungszeit am besten geeignet ist.

Der Effekt der Rayleigh-Streuung im Gel ist noch nicht geklärt. Es besteht natürlich die Möglichkeit, dass die Isotropie dadurch vermindert wird. Allerdings liegt es nahe, dass die sphärische Symmetrie und eine erneute Winkelmischung der Photonen durch die Rayleigh-Streuung, die Isotropie verbessert. Für ein konkretes Gel muss die Auswirkung der Rayleigh-Streuung auf die Isotropie untersucht werden.

3.5.7 Einsatzfähiger Temperaturbereich

Entscheidend für die Anwendung im späteren IceCube-Detektor bzw. PINGU, ist natürlich auch die Einsatzfähigkeit bei niedrigen Temperaturen. Im Inneren von IceCube herrschen zwischen -20°C und -40°C . Natürlich bedeutet das, dass das Gel auch in diesen Temperaturen einsetzbar bleiben muss. Für das optische Gel im POCAM wurde eine Mindesttemperatur von -50°C gewählt, um kein Risiko einzugehen.

Die meisten optischen Gele sind aus Silikon und haben entsprechend große, mögliche Temperaturbereiche in denen sie einsetzbar bleiben. Für gängige, optische Gele ist der (getestete) Temperaturbereich meist im Bereich von -55°C bis 200°C und damit geeignet für die Anwendung im POCAM.

3.5.8 Konsistenz & Adhäsion

Der letzte entscheidende Punkt ist die Konsistenz des Gels. Zum einen erhofft man sich eine mechanische, dämpfende Komponente zum Schutz des filigranen Inhalt des POCAMS. Zum anderen muss das Gel solide genug sein, um nicht mehr aus den Halbkugelschalen herauszufließen, wenn es dort hinein gegossen wurde und ausgehärtet ist.

In der Konsequenz wird also ein Gel benötigt, welches sowohl nach dem Aushärtvorgang flexibel bleibt, aber gleichzeitig solide genug ist nicht zu fließen. Um eine problemlose Montage der Glassphäre zu gewährleisten, sollte es außerdem nicht aus den Glashemisphären herausfallen, muss also nach dem Aushärten eine gute Adhäsion auf Glas aufweisen.

3.5.9 Zusammenfassung

Bevor zur Untersuchung eines konkreten Test-Gels übergegangen wird, sollen nochmal die wichtigsten, extrahierten Informationen zusammengefasst werden.

Optisch betrachtet, muss das Gel für Wellenlängen von $350\text{nm} - 500\text{nm}$ möglichst transmissiv sein. Dies impliziert, eine möglichst niedrige Absorption auf kurzen Strecken. Der Brechungsindex sollte dabei möglichst klein gehalten werden, um die Schattenränder definiert zu halten. Streuungseffekte durch Luftblasen und Fremdpartikel sollten minimiert werden. Die Rayleigh-Streuung und ihr Effekt auf die Isotropie muss im konkreten Fall untersucht werden.

Mechanisch gesehen, sollte das Gel zunächst die Temperaturen in IceCube von etwa -30°C unbeschadet überstehen, daher wurde für das Gel eine Mindeseinsatztemperatur von -50°C gesetzt. Die Konsistenz des Gels sollte flexibel aber fest sein, um eine mechanische Stütze für die integrierende Sphäre darzustellen, aber dennoch Vibrationen und Stöße zu kompensieren. Für die Montage ist außerdem eine gute Adhäsion auf Glas notwendig.

3.5.10 Das erste Test-Gel – EGel 3000

Da nun alle Eigenschaften des Gels geklärt sind, können Gele ausgewählt und getestet werden. Nach mehreren Gesprächen, mit verschiedenen Firmen auf diesem Gebiet, wurde eine erste Probe eines optischen Gels geordert, das optische Silikon-Gel „EGel 3000“. In Tabelle 3.1 sind dessen wichtigste Eigenschaften zusammengefasst.

Produkt	Komponenten	Material	n_{Gel} bei 587nm	Einsatztemperatur
EGel 3000	2 (A und B)	Silikon	1.41	-55°C - 200°C

Tabelle 3.1: Eigenschaften des optischen Gels EGel 3000. Alle Eigenschaften finden sich auch im Datenblatt [38].

3.5.10.1 Gel-Mischung & erste Erkenntnisse

Das EGel 3000 ist ein zwei-komponentiges Silikon-Gel mit einem Mischverhältnis von 1:1 der Komponenten. Im nicht vermischten Zustand weisen beide Komponenten eine sehr niedrige Viskosität auf.

Auch das vermischte Gel ist für ungefähr 40 Minuten nach dem Mischen noch flüssig und lässt sich problemlos auch in filigrane Bauteile eingießen, ohne dass Hohlräume bleiben.

Nach 24 Stunden bei Zimmertemperatur ist das Gel ausgehärtet aber dennoch sehr flexibel. Weder ändert es dabei sein Volumen, noch fließt es nach langem Kopfstehen.

Und trotz einer enorm starken Adhäsion auf Glas lässt es sich sowohl von unbehandelten, als auch vorher gründlich gereinigten, glatten Glasflächen rückstandsfrei lösen. Am einfachsten geht das mit kurz eingewirktem Isopropanol.

Von weniger glatten Flächen, wie zum Beispiel den verschmolzenen Flächen an den Rändern von Petrischalen, lässt es sich jedoch deutlich schwieriger lösen.

Bei optischer Betrachtung mit Laserlicht, der nicht evakuierten Mischung, zeigte sich eine deutliche Lichtspur im Inneren des Gel, siehe hierzu Abbildung 3.11.

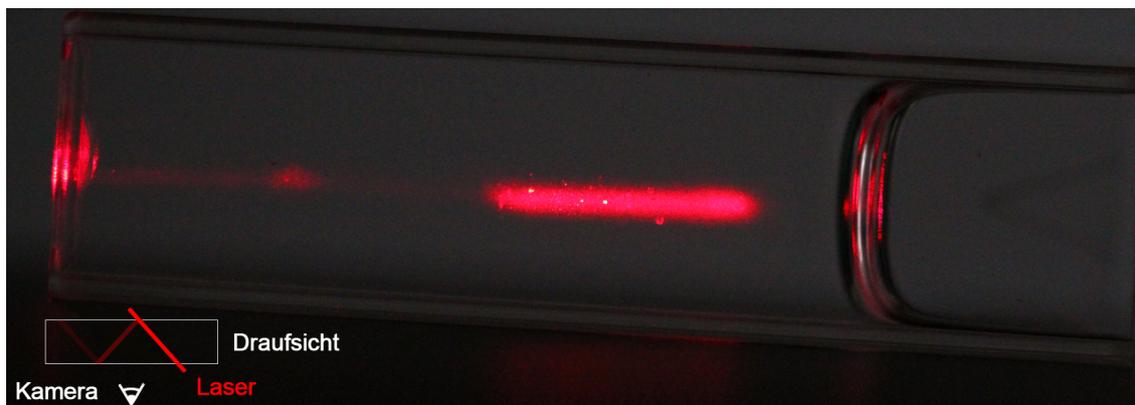


Abbildung 3.11: Lichtspur eines roten, von schräg rechts kommenden Laserstrahls durch eine Küvette mit dem optischen Gel „EGel 3000“. Man sieht die direkte Spur des Laserstrahls durch das Gel, den von der Küvette reflektierten Strahl und die **hellen Reflexe** an Partikeln und Luftblasen. Unten links ist die Anordnung veranschaulicht [44].

Diese rührt sowohl von der Reflexion an Luftblasen und Staubpartikeln, wie auch von der Rayleigh-Streuung her.

Eine nach dem Mischen kurzzeitig evakuierte Probe, zeigte eine ähnliche, minimal schwächere, Lichtspur. Der Einfluss der Evakuierung muss weiter untersucht werden.

Die Rayleigh-Streuung und ihr Effekt auf die Isotropie muss mit der Vermessung des Prototypen spezifiziert werden. Es wird aber zunächst, wie schon erwähnt, kein negativer Einfluss erwartet.

3.5.10.2 Transmissivität

Letztlich ist die Transmissivität des Gels entscheidend für die Anwendbarkeit im POCAM. Die Transmissionskurve des EGel 3000 ist in Abbildung 3.12, jeweils für eine evakuierte und eine nicht evakuierte Probe, dargestellt.

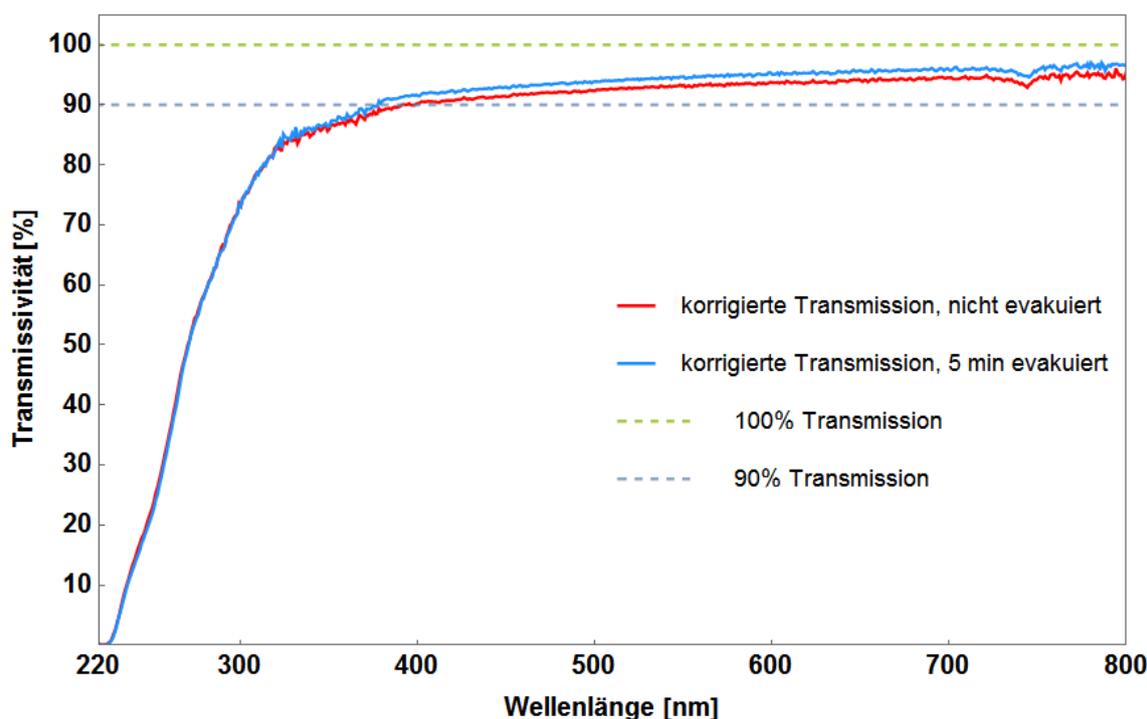


Abbildung 3.12: Prozentuales Transmissionsspektrum des getesteten, optischen Silikon-Gels EGel 3000 im Wellenlängenbereich von 220 – 800nm, für eine Gel-Strecke von 10mm. Man sieht die Kurven für eine nicht evakuierte Probe (rot) und eine Probe, die nach dem Mischen für fünf Minuten evakuiert wurde (blau). Im sichtbaren Bereich, von 400 – 800nm steigt die Transmissivität generell an und ist, mit konstant über 90%, sehr hoch. Im wichtigen, hochenergetischen Bereich, von 300 – 400nm, ist die Transmissivität schwächer. Hier steigt sie in beiden Fällen, mit wachsender Wellenlänge von etwa 70% auf 90%. Man sieht auch, die etwas bessere Transmissivität der evakuierten Probe im sichtbaren Bereich. Ob dies eine Konsequenz der Evakuierung ist oder nur eine statistische Fluktuation darstellt, muss weiter untersucht werden. Von den beiden Proben wurden Absorptionsspektren gemessen, diese für Reflexionen korrigiert und anschließend auf die Transmissivität des Gels zurückgeschlossen, gemäß [45] S. 33 – 37 und S. 107f.

Wie in Abbildung 3.12 gut zu sehen ist, ist die gute Transmissivität im sichtbaren Bereich für die Anwendung im POCAM bestens geeignet. Die schwächere Transmissivität

im Bereich von 300 – 400nm ist nicht ideal, könnte aber dennoch für eine Anwendung im POCAM geeignet sein. Auch muss weiter untersucht werden, ob eine Evakuierung die Transmission generell verbessert oder hier andere Faktoren eine Rolle spielen.

Hier bietet sich eine eingehendere Untersuchung an, um zu untersuchen ob das Gel trotzdem für die Anwendung im POCAM geeignet ist. Zumal es alle anderen Anforderungen nahezu ideal erfüllt.

Im nächsten Abschnitt soll nun noch die Auswahl der letzten Komponente, die drucksichere Glaskapsel, erläutert werden, um dann mit der Montage des Prototypen zu schließen.

3.6 Drucksichere Glassphäre

Um den POCAM letztendlich in IceCube abzulassen, muss die Drucksicherheit gewährleistet sein. In rund 2000m Tiefe im Inneren von IceCube herrscht ein Druck von 200 – 300bar, denen die Teflon-Sphäre alleine nicht standhalten würde. Wie schon erwähnt, soll ein Teil des POCAM deshalb eine drucksichere Glaskapsel sein. Im Folgenden soll nun deren Auswahl für die Anwendung im POCAM erläutert werden.

3.6.1 Geometrie

Zunächst musste entschieden werden, welche finale Geometrie der POCAM haben sollte, da diese maßgeblich durch die Glassphäre bestimmt würde. Wegen der begrenzten Größe der integrierenden Sphäre, richtet sich die Größe der Glaskapsel nach der Anwendung des POCAM. Dieser soll in ein, vorraussichtlich schmales, Bohrloch in IceCube bzw. PINGU abgelassen werden. Das heißt je kleiner der komplette POCAM, desto besser ist er für etwaige Tests geeignet, auch wenn im Einzelfall nur wenig Platz zur Verfügung steht.

Ein anderer Aspekt ist die komplizierte und aufwendige Herstellung von Glassphären, die solchen hohen Drücken standhalten. Man muss darauf achten, das die Kugeln möglichst sphärisch sind, das heißt möglichst wenig von perfekten Kugeln abweichen. Dies könnte sonst zu Spannungsspitzen unter Belastung führen, die eventuell eine Zerstörung der Sphäre zur Folge hätten. Die Kosten hängen daher extrem von der Geometrie ab, da größere Sphären deutlich schwieriger zu realisieren sind als kleinere. Für den POCAM ist das ein Vorteil, da eine möglichst kleine Geometrie ohnehin ideal wäre.

In Zusammenarbeit mit der Firma Nautilus, die sich auf Unterwasser-Behausungen für technische und optische Instrumente spezialisiert hat, wurden erste Möglichkeiten besprochen.

Nach mehreren konstruktiven Diskussion mit deren Experten, wurde eine Sphäre mit 4.5 Zoll (= 11.43cm) Durchmesser in Betracht gezogen. Hinsichtlich der integrierenden Sphäre mit 5cm Durchmesser, schien dies eine gute Wahl für den Prototypen darzustellen. Je nach Glasart würde dann die Dicke der Sphäre angepasst, um dem gewünschten Druck standzuhalten.

Kleinere Sphären kamen nicht in Frage, da hier eine Montage von dringend benötigten, drucksicheren, elektrischen Steckern nicht mehr möglich wäre. Größere Sphären würden die Kosten drastisch erhöhen. Es wurde sich daher für diese Größe entschieden.

3.6.2 Glas

Die entscheidende optische Komponente ist offensichtlich das Glas. Dieses hat aber auch mechanische Konsequenzen. Je nach Glasart und dessen Eigenschaften muss die Dicke der Glassphäre angepasst werden, um dem Druck standzuhalten. Aufgrund der optischen Anwendung, wurden die Glassorten Borosilikat, BK-7 und Quartz von Nautilus empfohlen.

Borosilikatglas und *BK-7* unterscheiden sich hauptsächlich durch das Herstellungsverfahren, wobei der Prozess bei BK-7 deutlich aufwendiger ist, aber in einem deutlich reineren, optischen Glas resultiert. Dies hat vor allem Auswirkung auf dessen Transmissivität.

Quartzglas ist qualitativ deutlich hochwertiger als die beiden anderen Varianten, vor allem wegen der hohen Transmissivität im UV-Bereich, allerdings auch deutlich teurer.

Hier muss jetzt auf die passenden optischen und mechanischen Eigenschaften geachtet werden, um das passende Glas für die POCAM-Anwendung zu wählen.

3.6.2.1 Drucksicherheit

Natürlich muss die Drucksicherheit für alle Glasvarianten gegeben sein. Um sicherzugehen, dass hierbei absolut kein Risiko eingegangen wird, wurde ein Minimaldruck festgelegt, unter dem die Sphäre intakt bleiben muss:

$$p_{\min, \text{Glas}} = 1000\text{bar} \quad (3.12)$$

Für die verschiedenen Glasvarianten sind die intrinsischen, mechanischen Eigenschaften ähnlich. Für die 4.5 Zoll Sphären ist eine Dicke von

$$d_{\text{Glas}} = 7\text{mm} \quad (3.13)$$

erhältlich. Mit dieser Dicke kann die Druckbeständigkeit (3.12) für alle Glassorten gewährleistet werden.

Dies ist in Übereinstimmung mit Berechnungen, die, hinsichtlich der Glassorten, mit dem Simulationsprogramm „*Under Pressure*“ durchgeführt wurden und eine Mindestdicke für die Materialien von 3 - 4mm lieferten [39].

3.6.2.2 Brechungsindex

Die Brechungsindizes der verschiedenen Glasvarianten sind sehr ähnlich. Für Licht der Wellenlänge 587nm sind die Brechungsindizes in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Glas	Borosilikat	BK-7	Quartz
Brechungsindex n	1.47	1.52	1.46

Tabelle 3.2: Brechungsindizes von Borosilikat-, BK-7- und Quartzglas bei einer Wellenlänge von $\lambda = 587\text{nm}$ [40].

Bei der Auswahl des Glases wird hauptsächlich auf die Transmissivität geachtet. Der Brechungsindex spielt hier eine untergeordnete Rolle und ist für den Prototypen kein primäres Auswahlkriterium. Hier ist eventuell noch Raum for Optimierungen.

3.6.2.3 Transmissivität

Das ausschlaggebende Kriterium ist wieder die Transmissivität. Aufgrund der Bedingung (3.5) sollte das Glas ab mindestens 350nm gut transmissiv sein.

Die drei möglichen Glasvarianten, haben sehr unterschiedliche Transmissionseigenschaften. Wie in Abbildung 3.13 zu sehen ist, ist Quartz schon ab 250nm gut transmissiv. Für BK-7 Glas bzw. Borosilikatglas hingegen ist das erst ab etwa 350nm bzw. 370nm der Fall. Hier fällt auf, das das optisch reinere BK-7 Glas generell etwa 10% mehr Transmissivität aufweist, als die normale Borosilikatvariante.

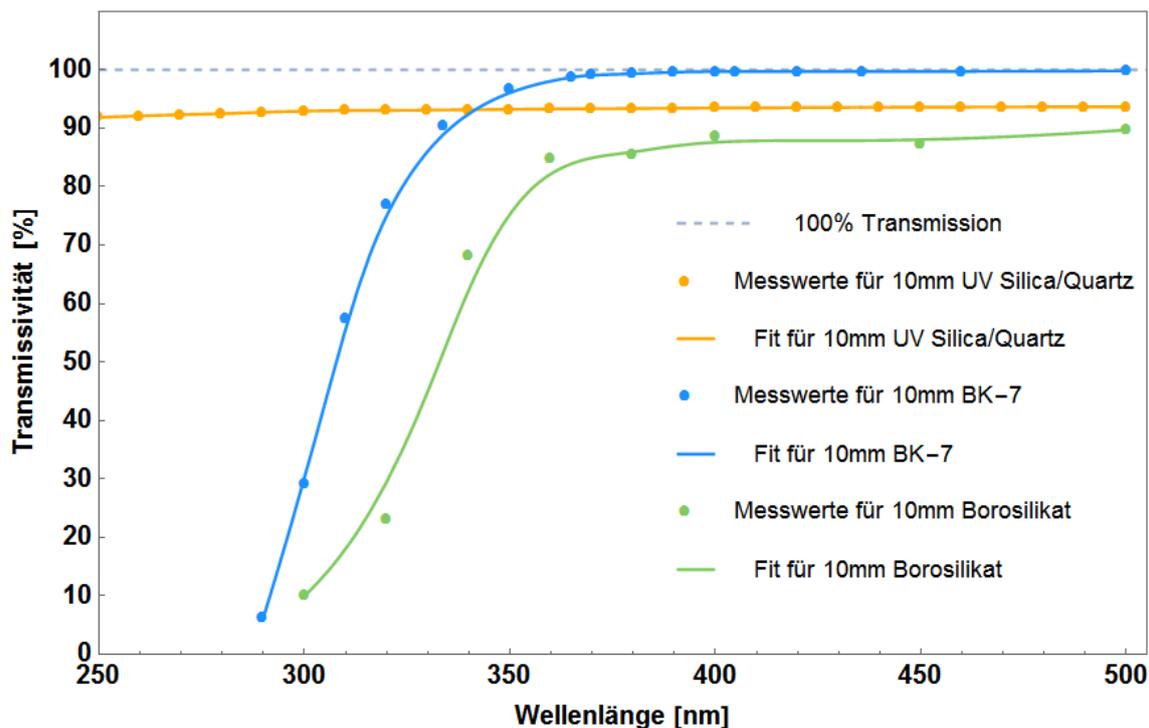


Abbildung 3.13: Die Transmissionsspektren im Wellenlängenbereich von 250 – 500nm für Quarzglas (gelb), BK-7 Glas (blau) und Borosilikatglas (grün) für eine Schichtdicke von 10mm. Eingezeichnet sind die Werte von Nautilus (Borosilikat und BK-7) bzw. Thorlabs (Quartz) und entsprechende Fits. Als erstes fällt die erwartete hohe Transmissivität des Quarzglases auf, die schon bei ungefähr 250nm beginnt. Der Unterschied zwischen Borosilikatglas und dem hochwertigeren BK-7 Glas ist deutlich sichtbar; während Borosilikatglas erst ab etwa 370nm eine Transmissivität von etwas über 80% aufweist zeigt BK-7 Glas schon ab 350nm, mit weit über 90%, ein sehr hohes Transmissionsvermögen [40][43].

3.6.2.4 Ergebnis

Zunächst wurde extrahiert, dass alle drei Glassorten bezüglich Drucksicherheit und Brechungsindex für die Anwendung im POCAM geeignet wären. Eine Glassphäre aus Quarz wäre um ein Vielfaches teurer als gleiche Sphären aus Borosilikat- oder BK-7 Glas und scheidet somit aus.

Letztlich war die deutlich bessere Transmissivität des BK-7 Glases, die nur mit moderater Kostenerhöhung verbunden ist, der entscheidende Faktor. Daher wurde sich für eine Sphäre aus BK-7 Glas entschieden, das sowohl passende, optische, als auch mechanische Eigenschaften vereint, die für den POCAM notwendig sind.

3.6.3 Elektrische Verbindung & Vakuumport

Zusätzlich zur Wahl des Glases muss auch noch beachtet werden, dass der POCAM sowohl evakuiert, als auch von außen gesteuert werden muss. Hierfür wird sowohl eine drucksichere, elektronische Verbindung aus der Sphäre heraus, sowie ein Vakuumventil benötigt. Die elektrische Verbindung wird in diesem Zusammenhang auch häufig mit *Connector* und das Vakuumventil als *Vakuum-Port* bezeichnet. Bei beiden ist es natürlich immens wichtig, dass sie das drucksichere System des POCAM nicht einschränken. Offensichtlich müssen dafür Löcher in die Glassphäre gebohrt werden, die natürlich Schwachstellen unter Belastung darstellen. Hier ist also große Expertise gefragt, um dies drucksicher zu realisieren.

3.6.3.1 Auswahlkriterien

Sowohl für den Connector als auch für den Vakuum-Port sind folgende, mechanische Faktoren entscheidend:

- Druckbeständigkeit
- Temperaturbeständigkeit
- Form und Größe → Schattengröße

Der Connector ist die elektrische Verbindung nach außen. Hierüber wird sowohl die LED angesteuert, als auch die Daten des Photomultipliers nach außen gesendet. Daher müssen hier auch die elektrischen Eigenschaften beachtet werden:

- Anzahl der elektrischen Kontakte/Pins
- elektrische Leistung

3.6.3.2 Connector

In Zusammenarbeit mit den Experten von Nautilus kam ein zylindrischer Stecker der Firma SubConn ins Gespräch, die „Circular Series“. Deren Form wäre vorteilhaft, da die Schatten im Vergleich zu abgewinkelten Steckern, deutlich kleiner wären.

Diesen Stecker gibt es in verschiedenen Varianten, die für den POCAM in Frage kommen. Als erstes die „SubConn Circular Series“ (SCS) und außerdem die kleinere „SubConn Micro Circular Series“ (SMCS).

Um nun eine Wahl hinsichtlich des Connectors zu treffen ist es nötig, beide Varianten zu vergleichen und zu untersuchen welcher Connector mit seinen Eigenschaften besser für die Anwendung im POCAM geeignet ist. Die Eigenschaften der SCS und der SMCS sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Modell	Pins	Ø/10-Pin [mm]	max. Druck [bar]	max. Spannung [V]
SCS	1 – 25	31	1.400	600
SMCS	1 – 21	25	700	300

Tabelle 3.3: Eigenschaften der Steckervarianten von SubConn: Circular (SCS) und Micro Circular (SMCS). Hierbei ist „Ø/10-Pin“, der Durchmesser der 10-Pin Variante.

In Abbildung 3.14 ist die Form des zylindrischen Steckers dargestellt, der sowohl für die SCS als auch für die SMCS gilt. Lediglich die Maße unterscheiden sich ein wenig.

Zunächst muss natürlich die Elektronik mit genügen Kontakten versorgt sein. Um dies zu gewährleisten sind mindestens acht Pins notwendig. Um etwaige, unvorhergesehe Komponenten zu berücksichtigen, wurde sich daher für eine Variante mit zehn Kontakten entschieden. Dies erlaubt die eventuelle Änderung der Komponenten, ohne auf die gleiche Pin-Anzahl angewiesen zu sein.

Da beide Varianten genügend Leistung für die Elektronik des POCAM bereitstellen, ist die mechanische Stabilität entscheidend. Da bei der Drucksicherheit kein Risiko eingegangen werden soll, wird für den Prototypen zunächst die SubCon Circular Series mit 10 Pins verwendet. Diese gewährleistet ausreichende Drucksicherheit bis 1.400bar.

Die Temperaturbeständigkeit für beide Modelle ist $-4 - 60^{\circ}\text{C}$ in Wasser und $-40 - 60^{\circ}\text{C}$ in Luft. Die explizite Anwendbarkeit für IceCube muss untersucht werden.

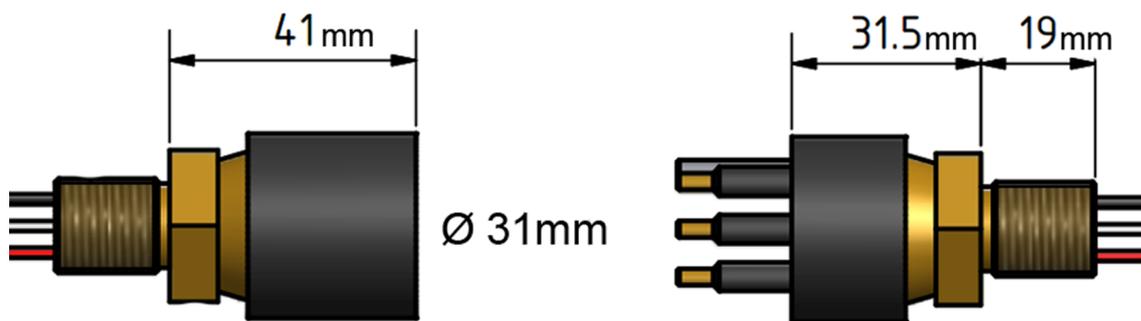


Abbildung 3.14: Form des Connectors SCS bzw. SMCS. Die Dimensionen entsprechen denen der SCS unterscheiden sich aber für die SMCS lediglich im Durchmesser merklich. Die hier dargestellte Version hat nur sechs Pins, für zehn Pins ist die Geometrie aber identisch [41].

3.6.3.3 Vakuum-Port

Der Vakuum-Port soll genutzt werden, um den fertigen Prototypen zu evakuieren. Dies hat mehrere Gründe. In jedem Fall muss die Restluft aus der Glassphäre entfernt werden, da sie sonst kondensieren könnte. Dies würde die Abstrahlcharakteristik verfälschen und muss verhindert werden. Außerdem kann durch den Unterdruck schon ein erster Verschluss der beiden Glashemisphären erreicht werden, da Nautilus die aufeinanderliegenden Flächen speziell dafür mit einem passenden Schliff ausgestattet hat.

Es ist noch nicht klar, ob das optische Gel benutzt werden soll oder nicht. Im Falle keiner Gel Nutzung ist der Vakuum-Port wichtig, um die Restluft zu entfernen. Sollte Gel benutzt werden, muss untersucht werden, ob eine Evakuierung notwendig ist und wenn ja ob Sie während oder nach dem Aushärtvorgang des Gels durchgeführt werden sollte.

Es wurde sich für einen hausinternen Port von Nautilus entschieden. Dieser hält einem Druck von 1100 bar stand und ist außerdem selbstschließend, also leicht zu handhaben. Temperaturbeständig ist er für jegliche Tiefseeanwendungen, für Eis muss dies noch untersucht werden. In Abbildung 3.15 ist er, inklusive seiner Maße, dargestellt.

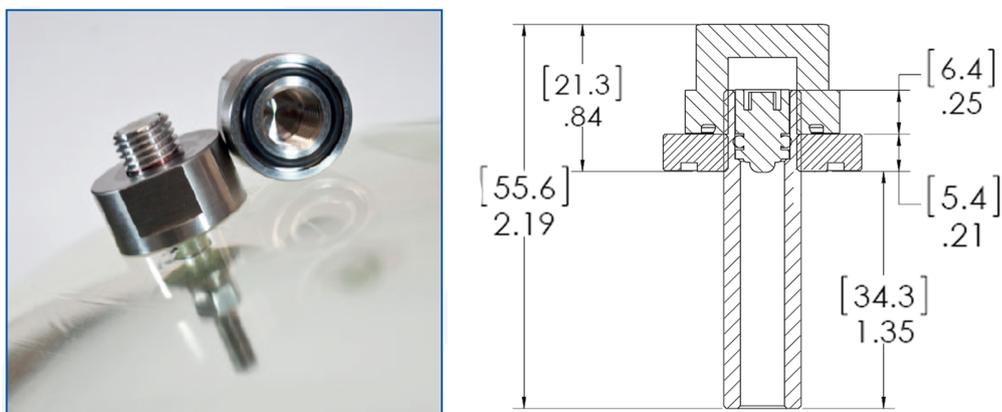


Abbildung 3.15: Selbst-schließender Vakuum-Port des POCAM. Links ist ein echtes Foto des Ports und rechts der Querschnitt mit den Maßen in Millimetern abgebildet [42].

3.6.3.4 Platzierung

Im Vergleich zur Kugeloberfläche sind die Stecker-Dimensionen relativ groß, dies hat große Schatten zur Folge. Daher wurde sich für eine Platzierung von Connector und Vakuum-Port auf einer Hemisphäre entschieden. So ist eine Hemisphäre frei von Schatten emittiert im besten Fall vollständig isotrop.

Um dennoch die Stabilität zu gewährleisten wurde von Nautilus empfohlen, diese direkt gegenüber voneinander zu montieren. Da die Drucksicherheit die grundlegende Aufgabe der Glassphäre ist, wurde dies entsprechend umgesetzt.

3.6.3.5 Ergebnis

Sowohl für den Vakuum-Port als auch für den Connector ist die Drucksicherheit das erste ausschlaggebende Kriterium. Aufgrund der Anforderung wurde sich daher für einen Subconn Connector der „Circular Series“ mit 10 Pins entschieden. Dieser gewährleistet die Drucksicherheit von 1000bar und stellt genügend elektrische Kontakte zur Verfügung. Für den Vakuum-Port gab es, wegen der Druckbeständigkeit, nur zwei Möglichkeiten, daher wurde sich für die kleinere Variante entschieden. Er ist außerdem selbstschließend und daher leichter zu handhaben.

Beide Stecker wurden wegen der großen Schatten auf einer Hemisphäre montiert, um zumindest eine isotrope Abstrahlung aus der unteren Hemisphäre erzielen zu können. Wegen der Stabilität wurde sie außerdem gegenüber voneinander montiert.

In Abbildung 3.16 ist die, von Nautilus hergestellte, Glaskapsel des Prototypen mit dem Connector und dem Vakuum-Port dargestellt.

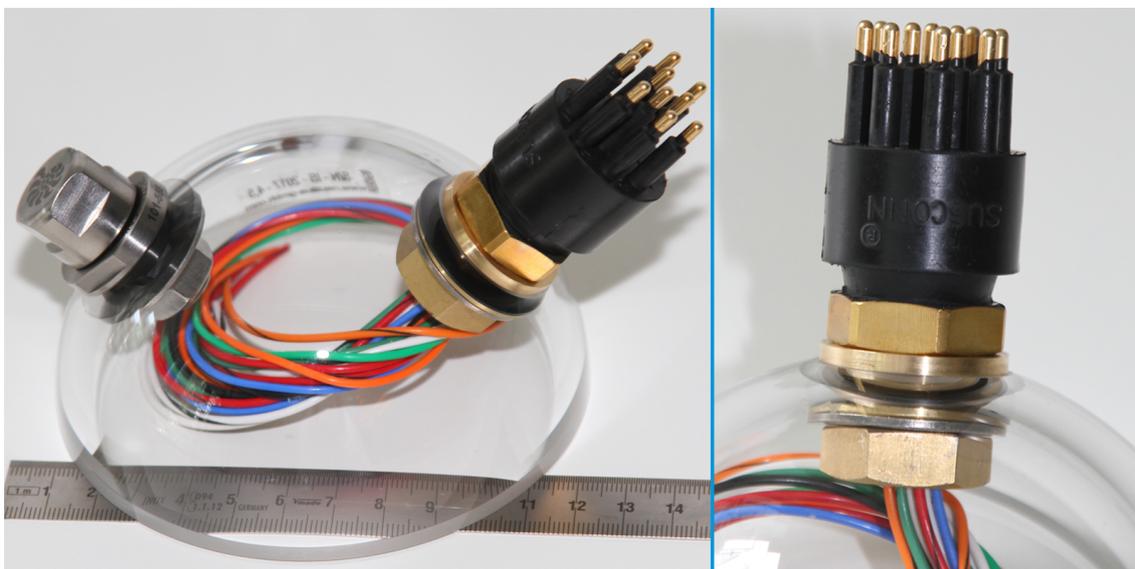


Abbildung 3.16: Die drucksichere Glassphäre von Nautilus. Man sieht links die obere Hemisphäre mit dem elektrischen Connector (schwarz, gold) mitsamt Kabelverbindungen und dem Vakuum-Port (metallisch). Außerdem die Brechung des Glases anhand des Maßbands. Rechts ist eine Nahaufnahme der Connector-Montage gezeigt [44].

3.7 Der erste Prototyp

Zum Zeitpunkt der Beendigung dieser Arbeit, war die Elektronik noch nicht einsatzbereit. Lediglich die Drucksichere Glaskapsel und der Prototyp der integrierenden Sphäre sind prinzipiell einsatzfähig. Es wird daher schematisch am Aufbau dieser beiden Komponenten der finale Prototyp erläutert.

Zunächst wird die integrierende Sphäre samt LED prinzipiell an die Elektronik angeschlossen und in der Mitte der Glassphäre montiert. Dann wird theoretisch die Elektronik in der Glassphäre verstaut und getestet.

Wenn sie funktioniert wird die Glassphäre anschließend akribisch gesäubert, geschlossen und evakuiert. Letztlich wird der Äquator noch mit Terostatband versiegelt und das ganze mit korrosionsbeständigem Band ummantelt, dann ist der Prototyp einsatzbereit. In Abbildung 4.1 ist der nicht versiegelte Prototyp mit prinzipieller Elektronik zu sehen.

4 Ausblick

Mit der Fertigstellung des Prototypen kann nun begonnen werden, die ersten optischen Messungen durchzuführen und sie mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen.

Auch muss entschieden werden, ob sich final für eine komplette Abstrahlung des POCAM oder doch die asymmetrische Variante entschieden wird.

Desweiteren muss die Frage der Gel-Nutzung geklärt werden. Erhältliche Gele verschlechtern die Abstrahlung des POCAM, insbesondere durch diffusere Schatten. Da es aber, eine wichtige, mechanische Komponente darstellt, muss hier abgewogen werden. Auch der Effekt der Rayleigh-Streuung auf die Abstrahlcharakteristik muss untersucht werden.

Letztlich kann auch noch die Schattengröße der Komponenten, wie Connector oder Vakuum-Port, eventuell verkleinert werden, wenn man den auszuhaltenden Maximaldruck etwas absenkt und so auf die kleineren Modelle ausweichen könnte.

In der Tat wird im IceCube Inneren nur ein Druck von etwa 200 – 300bar erwartet, aber für den Prototyp eine Druckbeständigkeit von 1000bar vorausgesetzt. Auch bei diesen Komponenten ist also noch Raum für Optimierung.

Der Bau des Prototypen ist ein großer Schritt in Richtung des ersten Einsatzes und erfordert jetzt nur noch die sensible Einstellung der finalen Materialparameter.



Abbildung 4.1: Der aktuelle Prototyp des Precision Optical Calibration Modules (PO-CAM) aus den einsatzfähigen Komponenten. Zu sehen ist die geschlossene, nicht evakuierte und nicht versiegelte **drucksichere Glaskapsel** mit dem **Connector** und dem **Vakuump-Port** an der unteren Hemisphäre sowie der Prototyp der **integrierenden PTFE-Sphäre** im Inneren. Außerdem eine nachträglich grafisch eingefügte Trennfläche der Hemisphären in blau. Es fehlen der **Kapustinsky Schaltkreis**, die **LED**, der **Photomultiplier** und der **Microcontroller**, da sich diese noch in der Test- bzw. Optimierungsphase befinden. Der geplante Platz der Elektronik ist durch die blaue Trennfläche im Prototyp veranschaulicht, jegliche Elektronik soll in der unteren Hemisphäre Platz finden, während die obere Hemisphäre zur isotropen Emission genutzt werden soll.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Standardmodell der Elementarteilchenphysik	2
1.2	Kosmischer Teilchenschauer	5
1.3	Normale und Invertierte Massenhierarchie der Neutrino-Oszillation	9
1.4	Cherenkov-Effekt – Polarisation des dieelektrischen Mediums	10
1.5	Cherenkov-Kegel und Spektrum	11
2.1	IceCube-Experiment – Aufbau	12
2.2	PINGU-String als Schematik für den IceCube-String	13
2.3	Aufbau eines Digitalen optischen Moduls (DOM)	13
2.4	Visualisierung der Neutrino-Detektion im IceCube-Detektor	14
2.5	IceCube und IceCube-Gen2 – Größenvergleich	15
2.6	Precision IceCube Next Generation Upgrade - PINGU	16
3.1	Mögliche POCAM-Konfigurationen	17
3.2	Skyplots für zwei Geometrien der PTFE-Sphäre	18
3.3	Multi-Port Sphäre	20
3.4	Strahlengang in der Multi-Port Sphäre	20
3.5	Transmissivität und Reflektivität von PTFE in Abhängigkeit der Dicke	21
3.6	Teflon-Prototyp für den POCAM	23
3.7	Transmissivität eines typischen, optischen Silikon-Gels	26
3.8	Strahlengang im POCAM - Einleitung	28
3.9	Strahlengang im POCAM mit Schatteneffekten	31
3.10	Skyplots für verschiedene Gel-Brechungsindizes	32
3.11	Lichtspur eines Lasers im EGel 3000	34
3.12	Transmissionsspektrum des EGel 3000	35
3.13	Transmissionsspektren für Quartz-, Borosilikat- und BK-7 Glas im nahen UV-Bereich	38
3.14	Connector für den Prototyp	40
3.15	Dimensionen des Vakuum-Ports	40
3.16	Fotos von der drucksicheren Glaskapsel	41
4.1	Aktueller Prototyp	43

Tabellenverzeichnis

1.1	Eigenschaften der bekannten Neutrino Flavor e , μ und τ	4
3.1	Ausgewählte Eigenschaften des EGel 3000	34
3.2	Brechungsindizes von Borosilikat-, BK-7- und Quartzglas bei $\lambda = 587\text{nm}$	37
3.3	Vergleich SubConn Circular und SubConn Micro Circular	39

Literatur

- [1] PAULI, W.: *Fünf Arbeiten zum Ausschliessungsprinzip und zum Neutrino* (1977). Wissenschaftliche Buchgesellschaft, [Abt.Verl.] (Texte zur Forschung ; Bd. 27). ISBN: 9783534067336
- [2] BERKELEY CENTER FOR THEORETICAL PHYSICS: *Neutrino Physics*; aufgerufen am 24. März 2016 unter: <http://ctp.berkeley.edu/neutrino/neutrino2.html>
- [3] CHADWICK, J.: *Possible Existence of a Neutron* (1932). Nature **129** (3252): 312. doi: 10.1038/129312a0
- [4] CHADWICK, J.: *Bakerian Lecture. The Neutron.* (1933). Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **142** (846): 1. doi: 10.1098/rspa.1933.0152
- [5] KERNFRAGEN: *Standardmodell* (Bild); aufgerufen am 24. März 2016 unter: http://www.kernfragen.de/sites/default/files/media/old_lexicon/Elementarteilchen2013.gif und leicht angepasst
- [6] COWAN, C. L., REINES, Jr. F., HARRISON, F. B., KRUSE, H. W., MCGUIRE, A. D.: *Detection of the Free Neutrino: A Confirmation* (1956). Science. **124**, S.103; aufgerufen am 24. März 2016 unter: <http://science.sciencemag.org/content/124/3212/103>
- [7] THE REINES-COWAN EXPERIMENTS: *Detecting the Poltergeist*; aufgerufen am 25. März 2016 unter: <http://permlink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-97-2534-02>
- [8] NOBELPRIZE.ORG: *The Nobel Prize in Physics 1995*; aufgerufen am 25. März 2016 unter: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1995/
- [9] CALDWELL, D.O.: *Current Aspects of Neutrino Physics* (2013). Springer Science & Business Media, ISBN: 978366204597-8 ; aufgerufen am 25. März 2016 über TUM eAccess unter: <http://link.springer.com.eaccess.ub.tum.de/book/10.1007%2F978-3-662-04597-8>
- [10] NOBELPRIZE.ORG: *The Nobel Prize in Physics 1988*; aufgerufen am 25. März 2016 unter: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1988/
- [11] PERL, M. L., ABRAMS G. S., BOYARSKI, A. M., BREIDENBACH, M., BRIGGS, D. D.: *Evidence for Anomalous Lepton Production in $e^+ - e^-$ Annihilation* (1975), In: Physical Review Letters. **35**, Nr. 22, S. 1489-1492; doi: 10.1103/PhysRevLett.35.1489 ; aufgerufen am 26. März 2016 unter: https://www.researchgate.net/publication/243466958_Evidence_for_anomalous_lepton_production_in_e_e_-_annihilation
- [12] KODAMA, K., USHIDA, N., ANDREOPOULOS, C., SAOULIDOU, N., TZANAKOS, G., et al: *Observation of Tau Neutrino Interactions* (2000); aufgerufen am 25. März 2016 unter: <http://arxiv.org/ftp/hep-ex/papers/0012/0012035.pdf>
- [13] GIUNTI, C.: *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics* (2007). Oxford [u.a.], Oxford Univ. Press, ISBN: 9786611160050; aufgerufen am 26. März 2016 über TUM eAccess unter: <http://lib.myilibrary.com.eaccess.ub.tum.de/Open.aspx?id=116005>
- [14] EIDELMANN, S.: *Neutrino Mass, Mixing and Flavor Change* (2004). Physics Letters B. 592, Nr. 1, Chapter 15. Revised 2005 by Kayser, B.; aufgerufen am 27. März 2016 unter: <http://pdg.lbl.gov/2005/reviews/numixrpp.pdf>

- [15] ZATSEPIN, G. T., KUZMIN, V. A.: *Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays* (1966). Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters 4: 78-80; aufgerufen am 28. März 2016 unter: http://www.jetpletters.ac.ru/ps/1624/article_24846.pdf
- [16] UNIVERSITÄT MAINZ - LOW ENERGY NEUTRINO PHYSICS: *Neutrino mass hierarchy in JUNO* (2015); aufgerufen am 28. März 2016 unter: <http://www.staff.uni-mainz.de/wurmm/juno.html>
- [17] ICECUBE WEBSEITE: *Detector*; aufgerufen am 29. März 2016 unter: <https://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector>
- [18] ICECUBE WEBSEITE: *In Science: Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector* (2013); aufgerufen am 29. März 2016 unter: <https://icecube.wisc.edu/gallery/press/view/1505>
- [19] PAUL, S., KAISER, N., WEISE, W.: *Teilchen und Kerne - Teil 1*; aufgerufen am 30. März 2016 unter: https://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/skript/Energieverlust_Teilchens.html; Abbildung 1.4 wurde leicht angepasst
- [20] LHC-FACTS: *RICH (Ring Imaging Cherenkov-Detektor) / Cherenkovstrahlung*; aufgerufen am 30. März 2016 unter: <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=rich>
- [21] CHERENKOV-KEGEL: *Cherenkov-Emission eines geladenen Teilchens* (Bild). Zur Verfügung gestellt von Katharina Brand, TUM
- [22] UNIVERSITÄT MAINZ: *Neutrino Massenhierarchie* (Bild); aufgerufen am 28. März 2016 unter: <http://www.staff.uni-mainz.de/wurmm/wurm-home/mass-hierarchy.png>
- [23] NOBELPRIZE.ORG: *Metamorphosis in the particle world* (2015); aufgerufen am 30. März 2016 unter: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/press.html
- [24] WIKIPEDIA: *Teilchenschauer* (Bild); aufgerufen am 31. März 2016 unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Luftschauder>
- [25] MENTION, G., FECHNER, M., LASSERRE, TH., MUELLER, TH., LHUILLIER, D., ET AL: *The Reactor Antineutrino Anomaly* (2011); aufgerufen am 31. März 2016 unter: <http://arxiv.org/pdf/1101.2755v4.pdf>
- [26] AARTSEN, M. G., ABBASI, R., ACKERMANN, M., ADAMS J., AGUILAR, J. A. ET AL: *Letter of Intent: The Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU)* (2014); aufgerufen am 31. März 2016 unter: <http://arxiv.org/pdf/1401.2046v1.pdf>
- [27] HALZEN, F., KLEIN, S.: *IceCube: An Instrument for Neutrino Astronomy* (2010); aufgerufen am 31. März 2016 unter: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1007/1007.1247.pdf>
- [28] KARLEN D.: *The number of light Neutrino Types from Collider Experiments Revised* (2008); aufgerufen am 01. April 2016 unter: <http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-light-neutrino-types.pdf>
- [29] ICECUBE WEBSEITE: *Detector IceCube Teilchen Detektion* (Bild); aufgerufen am 02. April 2016 unter: https://icecube.wisc.edu/icecube/static/science/images/how_does_icecube_work.png und leicht angepasst

- [30] ICECUBE WEBSEITE: *Beyond IceCube* IceCube-Gen2 (Bild) ; aufgerufen am 02. April 2016 unter: https://icecube.wisc.edu/icecube/static/science/images/icecube_gen2.png
- [31] ICECUBE WEBSEITE: *Beyond IceCube*; aufgerufen am 02. April 2016 unter: <https://icecube.wisc.edu/science/beyond>
- [32] ICECUBE WEBSEITE: *Beyond IceCube* PINGU (Bild) ; aufgerufen am 02. April 2016 unter: https://icecube.wisc.edu/icecube/static/science/images/PINGU_LoI_sm.png
- [33] VEENKAMP, J.: *A Precision Optical Calibration Module for IceCube-Gen2* – Masterarbeit (2016)
- [34] *Erklärung und Erstellung von Skyplots in Geant4* - mit freundlicher Unterstützung von Andreas Gärtner, Kilian Holzapfel und Joost Veenkamp innerhalb der Forschungsgruppe von Elisa Resconi
- [35] *Erklärung der Funktionsweise der Elektronik, der LED und der Effekte der vielen Parameter des Kapustinsky-Schaltkreises* - mit freundlicher Unterstützung von Antonio Becerra Esteban innerhalb der Forschungsgruppe von Elisa Resconi
- [36] POVH, B., RITH, K., SCHOLZ, C., ZETSCHKE, F., RODEJOHANN, W.: *Teilechen und Kerne - Eine Einführung in die physikalischen Konzepte* (2014). Springer, ISBN: 978-3-642-37821-8. Seite 176, Gleichung (11.15)
- [37] QUANTUM SILICONES: *QSil 216 - Technical Data-Sheet*; aufgerufen am 30. April 2016 unter: <http://www.quantumsilicones.com/wp-content/uploads/2012/02/QSil-2163.pdf>
- [38] ACC SILICONES: *EGel 3000*; aufgerufen am 01. Mai 2016 unter: <http://www.acc-silicones.de/content/products/egel3000.ashx>
- [39] DEEPSEA.COM: *Under Pressure Design Software*; aufgerufen und benutzt am 26. Januar 2016 unter: <http://www.deepsea.com/knowledgebase/design-tools/under-pressure-design-software/>
- [40] NAUTILUS MARINE SERVICE GMBH: *Datenblätter für das BK-7 Glas und das Boro-silikatglas*. Mit freundlicher Genehmigung von S. Pausch, Nautilus GmbH
- [41] MACARTNEY.COM: *Subconn Circular Series* Datenblätter der Circular und Micro Circular Series; aufgerufen am 07. Mai 2016 unter: <http://www.macartney.com/what-we-offer/systems-and-products/connectivity/subconn/>
- [42] NAUTILUS MARINE SERVICE GMBH: *Datenblätter für den Selbst-schließenden Vakuum-Port*. Mit freundlicher Genehmigung von S. Pausch, Nautilus GmbH
- [43] THORLABS: *UV Fused Silica (Quartz) High Precision Windows* - Datenblatt; aufgerufen am 14. Mai 2016 unter: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3983
- [44] FOTOGRAFIEN: *Lichtspuren, Teflon-Sphären, Glas-Sphären und der Prototyp*. Fotografiert und mit freundlicher Genehmigung von Sonja Winkler, TUM
- [45] MEYER, J.: *Realization and Characterization of the Muon Veto Scintillator and the Buffer Liquid of the Double Chooz Experiment* – Diplomarbeit (2010)

-
- [46] KAPUSTINSKY, J.S., DEVRIES R.M., DIGIACOMO, N.J., SONDEHEIM, W.E., SUNIER, J.W., COOMBES, H. : *A FAST TIMING LIGHT PULSER FOR SCINTILLATION DETECTORS* (1985), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A241 (1985) 612-613; North-Holland, Amsterdam; viewed on 21st June 2016 via: <http://ific.uv.es/~yepes/varios/bibliography/kapustinsky.pdf>
- [47] GRUPO DE ATLAS ENERGIAS - UCM: *Cherenkov-Radiation*; aufgerufen am 04. Juli 2016 unter: <http://www.gae.ucm.es/~emma/docs/tesina/node4.html>
- [48] AARTSEN, M.G., ABBASI, R., ACKERMANN, M., ADAMS, J., AGUILAR, J. A., et al: *Letter of Intent: The Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU)* (2014); aufgerufen am 05. Juli 2016 unter: <https://arxiv.org/pdf/1401.2046v1.pdf>

Danksagung

Diese Arbeit war mein bisher intensivstes wissenschaftliches Projekt. Dies hätte ich ohne die viele Unterstützung einiger, toller Personen vermutlich nicht geschafft und ich möchte dies hiermit nutzen um diesen Menschen „Danke“ zu sagen.

Zunächst möchte ich mich bei meiner Forschungsgruppe bedanken, allen voran bei Professorin Elisa Resconi, die mich bei dieser Arbeit mit einer sehr angenehmen Mischung aus Freiheit und Fokus auf den richtigen Weg gebracht hat. Dann bei Roman Gernhäuser, der mir stets mit fachmännischem Rat bei Problemen zur Seite stand und mir half wo immer es nötig war. Außerdem bei Kilian, Antonio, Andi, Lukas und Joost die mir immer halfen wenn ich etwas nicht verstand oder nicht weiter kam. Eine angenehmere Atmosphäre hätte ich mir nicht wünschen können.

Außerdem meinen Freunden und meiner Familie, als erstes bei meiner Freundin Lena, die mich durch diese, wie auch durch alle anderen, schweren Zeiten treu begleitet hat und die mir das Leben jeden Tag ein bisschen versüßt. Dann meinen Eltern, Prisca und Gerald Henningsen, dafür dass Sie an mich geglaubt haben und mich bei meinem Studium stets unterstützten. Genauso bei meinem Onkel und meiner Tante, Roger und Lisa Paul, die mir seit dem ersten Semester mit viel Rat und Unterstützung zur Seite standen.

Natürlich auch bei meinen engen Freunden zuhause, mit denen die Abende, nach anstrengendem Lernen, immer lustig waren. Und meinem treuen Begleiter durchs Physik Studium, Tobias Duswald, ohne den mein Ritt durch das Abenteuer Physik wahrscheinlich deutlich holpriger ausgefallen wäre.

Letztlich noch bei dem Experten für die Glassphäre Steffen Pausch von Nautilus, der mir mit Rat, Tipps und Expertise zur Seite stand und mich auf dem Weg zum Prototypen unterstützt hat.

Danke!

– Felix Henningsen