



Abschlussarbeit im Bachelorstudiengang Physik

Simulationen eines idealisierten optischen Präzisionskalibrations-Moduls für IceCube-Gen2

Simulation of an idealized precision optical calibration module for
IceCube-Gen2

Nicola Söker

26. Oktober 2015

Erstgutachter (Themensteller): Prof. Dr. E. Resconi
Zweitgutachter: Prof. Dr. W. Petry

Abstract

A new calibration device called precision optical calibration module or shortened POCAM is currently under development. POCAM will be used for IceCube-Gen2 and especially as a part of this for the planned PINGU detector. It is a self-calibrating isotropic reference light source and will be used to investigate the optical properties of the deep glacier ice and to calibrate the used photosensors. For this thesis I investigated the response of the planned PINGU detector to an idealized POCAM in a simulation. It shows that with an ideal POCAM, PINGU is able to differ between small variations of optical ice properties, change in detection efficiency and that the detector response strongly depends on parametrizations of the refrozen ice from drilling.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	iii
1 Einleitung	1
2 IceCube	3
2.1 Detektor Geometrie	3
2.2 DOM	4
2.3 Kalibrierung	6
3 PINGU	9
3.1 Bestimmung der Neutrino-Massenhierarchie mit PINGU	9
3.2 PINGU Geometrie	10
3.3 PINGU-DOM (PDOM)	11
3.4 POCAM	12
4 Simulation einer idealisierten POCAM in PINGU	15
4.1 Einfluss zu starker Photonengruppierung	17
4.2 Einfluss des HoleIce Parameters	19
4.3 Auswirkungen zweier verschiedener Eismodelle	22
4.4 Auswirkung variierter PDOM-Effizienzen	24
4.5 Waistband Realisierung	28
5 Ergebnisse und Ausblick	31
Literatur	33
Danksagungen	35

Kapitel 1

Einleitung

IceCube ist ein 1 km^3 großer Eis-Cherenkov-Detektor am geographischen Südpol. Mit ihm werden Neutrinos atmosphärischen sowie kosmischen Ursprungs studiert. Er umfasst über 5000 Photosensoren in einer Tiefe von 1450 m bis 2450 m im Eis. Geplant ist das Projekt IceCube-Gen2, mit dem das observierbare Energiespektrum der Neutrinos erweitert soll. Teil davon ist ein neuer Detektor namens PINGU, welcher durch bislang unerreichte Statistik niederenergetischer atmosphärischer Neutrinos die bisher unbekannte Neutrinomassenhierarchie bestimmen soll. Für PINGU sollen neue Photosensoren in kleineren Abständen im Zentrum von IceCube installiert werden. Um die Qualität der Messdaten von PINGU zu verbessern, soll neben verbesserten Varianten bewährter Instrumente das neue optische Präzisionskalibrations-Modul POCAM (Precision Optical CALibration Module) eingesetzt werden. Die POCAM ist eine selbst kalibrierende, isotrope Referenzlichtquelle, die an verschiedenen Stellen des Detektors im Eis platziert werden soll.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Reaktion des geplanten PINGU Detektors auf eine ideale POCAM in der Simulation. Kapitel 2 umreißt den bisherigen IceCube Detektor. In Kapitel 3 wird PINGU und das aktuelle Design der POCAM vorgestellt. Die durchgeführten Simulationen sind in Kapitel 4 gezeigt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und eine mögliche Fortsetzung der Arbeit finden sich in Kapitel 5

Kapitel 2

IceCube

Der IceCube-Detektor misst orts- und zeitaufgelöst die Lichtintensität innerhalb des Südpoleises in einem Volumen von ca. 1 km^3 in 1450 m bis 2450 m Tiefe, sowie in Wassertanks verteilt auf der Oberfläche. Sein Zweck ist die Cherenkovstrahlung zu detektieren, die von aus Neutrino-Kollisionen hervorgehenden relativistischen geladenen Teilchen ausgelöst wird und somit Rückschlüsse über die Energie, Herkunftsrichtung und Flavor der Neutrinos zuzulassen. Mit den Daten wird nach den bisher unbekanntem Quellen für hochenergetische Neutrinos gesucht, sowie allgemein der Fluss atmosphärischer und kosmischer Neutrinos studiert. Von IceCube werden täglich ca. 200 hochenergetische Neutrinoevents gemessen. Das Energiespektrum der detektierten Neutrinos reicht von 10 GeV bis zu mehreren PeV. Insgesamt sind über 300 Menschen verteilt auf 40 Institute an dem Projekt beteiligt.

Der Detektor verfügt über verschiedene Triggersysteme um Ereignisse aufzuzeichnen. Die gewonnenen Daten werden teils vor Ort gefiltert und über eine Satellitenverbindung nach Madison übertragen. Dort werden sie weiter analysiert und an verschiedene Stellen weiter verteilt. Dies gestattet die Messdaten nahezu live zu verfolgen. Die ungefilterten Rohdaten werden später per Flugzeug ausgeflogen.

2.1 Detektor Geometrie

Das IceCube Array umfasst 5160 Photosensoren, sogenannte DOMs, die auf 86 Strings verteilt tief im Eis liegen. 78 Strings sind in einer hexagonalen Anordnung mit Abständen von ca. 120 m über eine Fläche von ca. 1 km^2 verteilt. An ihnen sind ab 1450 m Tiefe alle 17 m 60 DOMs angebracht. 8 Strings a 60 DOMs bilden DeepCore, sie sind in kleineren Abständen zueinander im Zentrum von Ice Cube platziert. In diesem Bereich ist der Detektor sensibler für Events bis runter zu 10 GeV. An der Oberfläche befindet sich IceTop. Es besteht aus 162 Wassertanks die sich paarweise in der Nähe der Stringbohrungen befinden und jeweils 2 DOMs beinhalten. Mit ihnen wird unter anderem die Zusammensetzung der kosmischen Strahlung untersucht [1] und spielen eine Rolle in der Kalibrierung des Detektors.

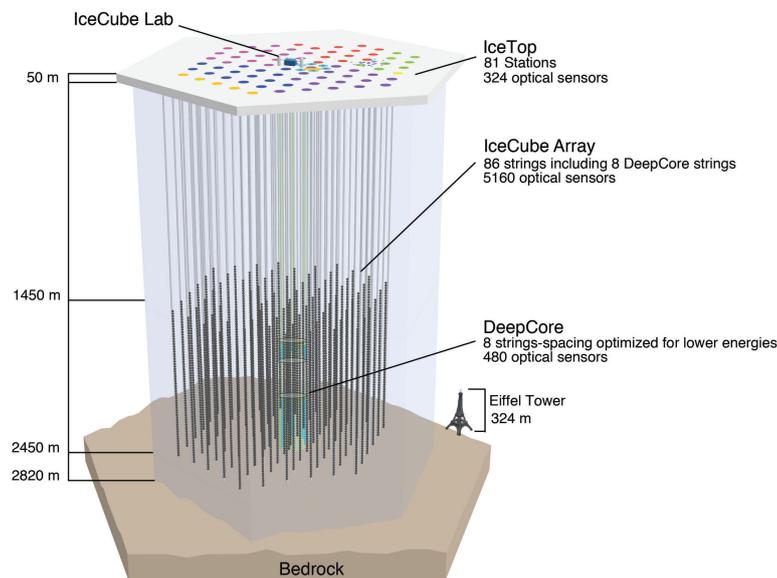


Abbildung 2.1: 3D Visualisierung des IceCube-Detektors

2.2 DOM

Ein Digital Optical Module (DOM) ist eine kugelförmige, gläserne Druckkapsel in der verschiedene Hardware-Elemente untergebracht sind. Zu der Druckkapsel gehört noch ein ringförmiger Metallgurt, der Waistband genannt wird. Der Aufbau ist in Abbildung(2.2) gezeigt. Das Herzstück bildet dabei die 25 cm Photomultiplier Tube (PMT). Für die DeepCore DOMs wurde eine verbesserte Version der PMT mit höherer Quantenausbeute verwendet. Die PMT nimmt den Großteil des DOMs ein. Ihre sensitive Fläche ist nach unten orientiert und in Gel eingebettet, dass die PMT mit dem Glas optisch koppelt. Ihr Spektrum reicht von 300 bis 550 nm, wobei Licht mit Wellenlängen kleiner 350 nm bereits von dem Glas und dem Gel absorbiert werden [2]. Innerhalb des DOMs befindet sich Elektronik um die analogen Signale der PMT zu digitalisieren, zwischenspeichern und weiterzuleiten, sowie Teile des Triggersystems. Auf dem Flasherboard sind zwölf LEDs montiert, sogenannte Flasher, von denen die Hälfte horizontal und der Rest mit 40° nach oben zeigend orientiert sind. Die Verbindung nach außen stellt der Penetrator dar, durch den Kabel zur Datenübertragung und Spannungsversorgung laufen.

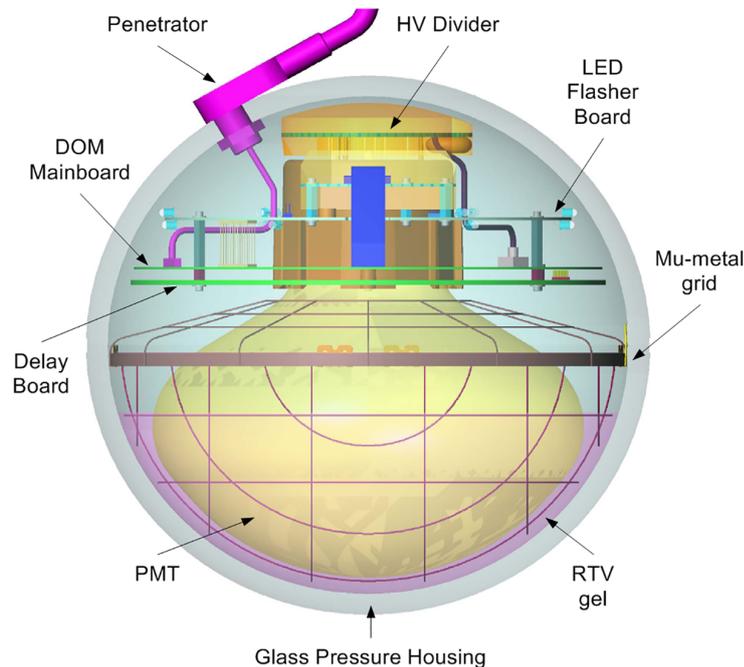


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines DOMs

Die DOMs sind robust gebaut, einer Schätzung nach könnten 97 % der DOMs 25 Jahre funktionsfähig bleiben.

Um die DOMs in Position zu bringen wurden Schmelzbohrungen durchgeföhrt. Dabei wurden mit heißem Wasser tiefe Säulen in das natürliche Eis geschmolzen. Die Strings mit den DOMs in die mit Wasser gefüllten Löcher versenkt. Anschließend ließ man das Wasser wieder gefrieren. An einem DOM-Paar wurden Kameras installiert um den Gefrierprozess an sich und das Eis im Bohrloch besser zu verstehen. Abbildung(2.3) zeigt wie sich in der Mitte des Bohrlochs eine Säule trüben Eises gebildet hat. Diese Gegebenheit wird für alle Bohrungen angenommen.

Die PMTs wurden vielseitig vermessen [2]. Dabei hat sich ergeben, dass die Schwankungen von PMT zu PMT klein genug sind, um die mittleren Werte und Best Fits einiger für alle zu benutzen. Untersucht wurden mitunter die Reaktion der PMTs auf einzelne Photonen, die Richtungsabhängigkeit der Effizienz und das Sättigungsverhalten der PMTs. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die PMT untereinander doch so verschieden sind, dass jedem DOM im Nachhinein eine eigene Effizienz anhand von Messdaten des laufenden Detektors zugesprochen wird. Der Temperaturverlauf

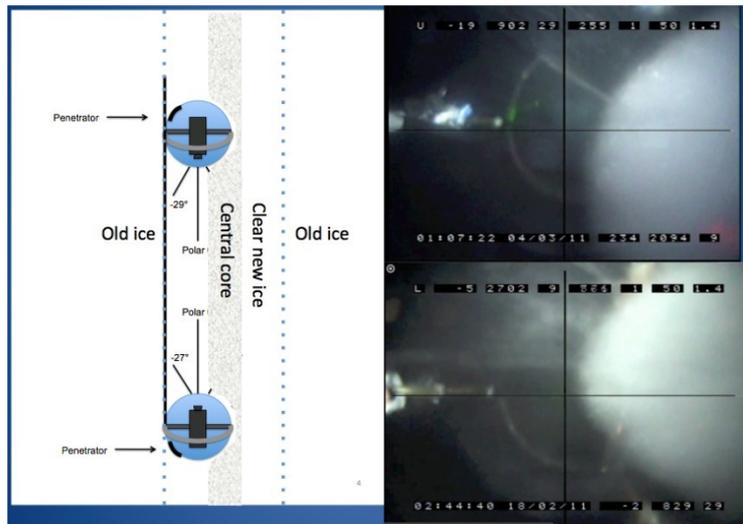


Abbildung 2.3: Bild der Swedish Camera (rechts) und einer Skizze der Situation (links). Zu sehen ist eine Säule trüben Eises in der Mitte der Bohrung [3]

der Noise Rate liegt von $-80^\circ C$ bis $-10^\circ C$ zwischen 500 Hz und 300 Hz. Die Rate ist so gering, dass nur etwa 1 % der Myonenevents von einem Noisehit der 100 nächsten DOMs begleitet werden. Allerdings bringt sie einen großen Unsicherheitsfaktor bei der Messung des Neutrinoflusses einer Supernova.

2.3 Kalibrierung

In IceCube werden und wurden unterschiedliche Methoden angewandt um die Aussagekraft der Messdaten stets zu verbessern.

Eigenheiten der Hardware lassen sich vorher bestimmen und optimieren. Auch die im Eis herrschenden Bedingungen wurden teils nachgeahmt. Es gibt jedoch Faktoren auf die man nur bedingt Einfluss hat, wie z.B. den Gefrierprozess nach dem Positionieren der DOMs, sowie deren genaue Position und Orientierung.

Das Targetvolumen und Lichtmedium ist das natürliche Südpoleis. Es kann nicht verändert, nur studiert werden. Ab einer Tiefe von etwa 1300 m wird das Eis sehr transparent und die Absorptionslänge (beschrieben im nächsten Absatz) erreicht bis zu 250 m. Es hat sich gezeigt, dass es (in erster Linie tiefenabhängige) Schwankungen der optischen Eigenschaften in dem Detektorvolumen gibt, verursacht durch Staubpartikel, die eingeschlossen wurden als sich das Eis schichtenweise gebildet hat. Diese Staubpartikel spiegeln zugleich die damaligen Umweltbedingungen am Südpol wider.

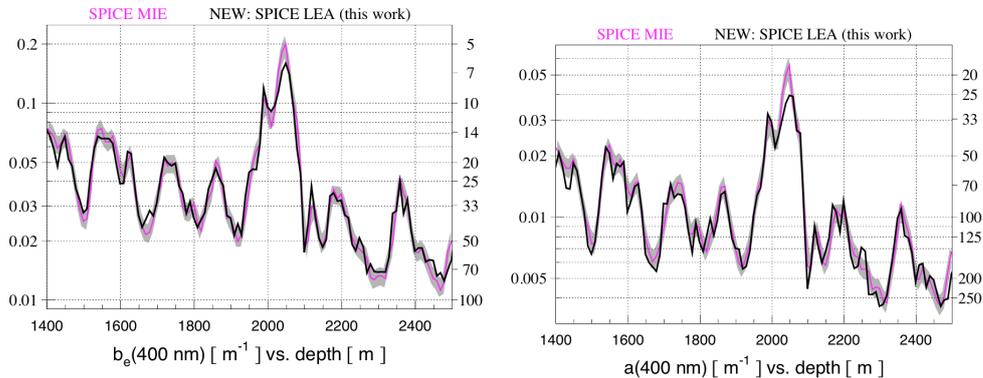


Abbildung 2.4: Tiefenabhängigkeit der Streu(links)- und Absorptionslänge(rechts) der Eismodelle Mie und Lea bei einer Wellenlänge von 400 nm. Bei ca. 2000 m Tiefe befindet sich eine Staubschicht in der die Streu/Absorptionslänge dramatisch kurz werden. [4]

Die optischen Eigenschaften des Eises werden in IceCube durch zwei Werten beschrieben:

- Die Absorptionslänge - die Länge ab der die Population der Photonen auf das $1/e$ -fache gesunken ist)
- Die Streulänge - die mittlere Länge ist, die ein Photon zurücklegt bis es nach einer gewissen Anzahl an Streuungen Informationen über seine ursprüngliche Richtung verloren sind.

Die Positionsabhängigkeit der Streu/Absorptionslänge wurde in einem sogenannten Eismodell parametrisiert. Dazu wurde mit den auf den DOMs installierten Flaschern gearbeitet. Die aktuelle Version des Eismodells trägt den Namen SpiceLea. Es beinhaltet nicht nur die Tiefenabhängigkeit, sondern auch eine Schräglage der Staubschichten, sowie eine azimutale Anisotropie der optischen Eigenschaften [4]. In Abbildung(2.4) ist die Tiefenabhängigkeit der optischen Eigenschaften für SpiceLea und seiner Vorgängerversion SpiceMie dargestellt. In SpiceMie ist die azimutale Anisotropie noch nicht berücksichtigt [5].

Bei etwa 2000 m befindet sich eine relativ undurchsichtige Staubschicht in der die Absorptionslänge bis auf unter 10 m fällt. In diesem Bereich ist der Detektor nahezu "blind".

Kapitel 3

PINGU

Das Hauptziel von PINGU ist die Bestimmung der Neutrinomassenhierarchie, beschrieben in Kapitel 3.1. Der PINGU-Detektor übernimmt größtenteils das erfolgreiche Funktionsprinzip von IceCube. DOMs sollen die Cherenkovstrahlung von relativistischen, geladenen Teilchen aus Neutrinoreaktionen messen.

Für PINGU sollen DOMs in kleineren Abständen zueinander als bei dem IceCube-Detektor in dessen Zentrum tief im Eis platziert werden. PINGUs Maßstab ist dabei auf Neutrinos mit Energien zwischen 1 GeV und 20 GeV ausgelegt.

Das bisherige IceCube Array kann dabei als Veto benutzt werden um den meisten Background an atmosphärischen Myonen zu filtern, sodass diese so gut wie keine Rolle mehr für PINGU spielen.

Basierend auf den Erfahrungen mit IceCube lassen sich materieller und zeitlicher Aufwand gut abschätzen. PINGU könnte innerhalb der nächsten 7 Jahre fertiggestellt werden. Für genauere Informationen zu dem gesamten Kapitel siehe [6].

3.1 Bestimmung der Neutrino-Massenhierarchie mit PINGU

Die Neutrino-Massenhierarchie (NMH) ist die Reihenfolge der noch nicht bekannten absoluten Massen der Neutrinomasseneigenzustände. In der Theorie mit drei Neutrinomasseneigenzuständen gibt es zwei mögliche Hierarchien, die eine wird als normale (NH) und die andere als invertierte (IH) Hierarchie bezeichnet. Zu tragen kommt die NMH bei der Berechnung Neutrinooszillationswahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung des Mikheyev–Smirnov–Wolfenstein (MSW) Effekts [7, 8]. Der MSW Effekt beruht auf der Wechselwirkung von Neutrinos mit Elektronen auf deren Pfad. Eine signifikante Elektronendichte stellt die Erdmaterie dar, die atmosphärische Neutrinos durchlaufen, wenn sie auf der gegenüberliegenden Seite der Erde entstanden sind und einen Großteil der Erde passiert haben.

Der Auswirkung des MSW Effekts unterscheidet sich für Neutrinos und ihrer Antiteilchen und vertauscht ihn im Falle einer IH. Abbildung(3.1) zeigt die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Myonneutrinos, die bestimmt ist durch dessen Energie

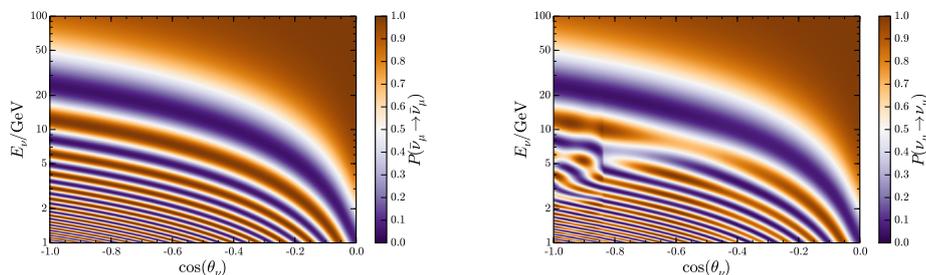


Abbildung 3.1: Überlebenswahrscheinlichkeit eines atmosphärischen Myonenneutrinos und seines Antiteilchens unter Berücksichtigung des MSW Effekts basierend auf einer normalen Hierarchie. Der Winkel θ_ν ist der Zenitwinkel unter dem das Neutrino am Detektor ankommt. Dabei steht $\cos(\theta_\nu) = -1$ für Neutrinos die die gesamte Erde durchlaufen haben. Der Effekt ist für Neutrinos kleiner 20 GeV besonders ausgeprägt. Im Falle invertierter Hierarchie vertauschen die Plots für Teilchen und Antiteilchen.[9]

und zurückgelegtem Pfad (in diesem Fall durch die Erde, ausgedrückt durch den Zenitwinkel unter dem es auf den Detektor trifft).

Im Allgemeinen zeigen sich Neutrinooszillationen durch Abweichungen des erwarteten zu dem gemessenen Neutronenfluss. Da IceCube nicht zwischen Neutrino- und Antineutrinoevents unterscheiden kann, misst es die Summe beider Flüsse. Weiter gibt es eine Asymmetrie in dem Fluss Atmosphärischer Neutrinos und deren Antiteilchen, sowie in deren beider Wirkungsquerschnitte in dem Eis. Somit sollten sich charakteristische gemessene Neutronenflüsse für beide Hierarchien ergeben. Die Differenz beider Flüsse wird im Bereich von 5 GeV bis 20 GeV für atmosphärische Neutrinos die den Erdkern durchlaufen haben als ausreichend ausgeprägt eingeschätzt um von PINGU unterschieden werden zu können. Die NMH könnte so innerhalb von 3,5 Jahren mit 3σ bestimmt werden [6]. Zusammen mit weiteren Experimenten die anderswo mit anderen Methoden arbeiten, ergäbe sich bei Übereinstimmung aller ein solides Bild bzw. bei keiner Übereinstimmung Raum für Neues. Abbildung(3.2) zeigt die Sensitivität auf die NMH verschiedener in Vorbereitung befindlicher Experimente für den Fall einer normalen Hierarchie.

3.2 PINGU Geometrie

Die aktuelle Auslegung von PINGU, wie sie in Abbildung(3.3) zu sehen ist, sieht vor 40 neue Strings a 96 DOM in Abständen von 22m in hexagonaler Struktur in Mitten

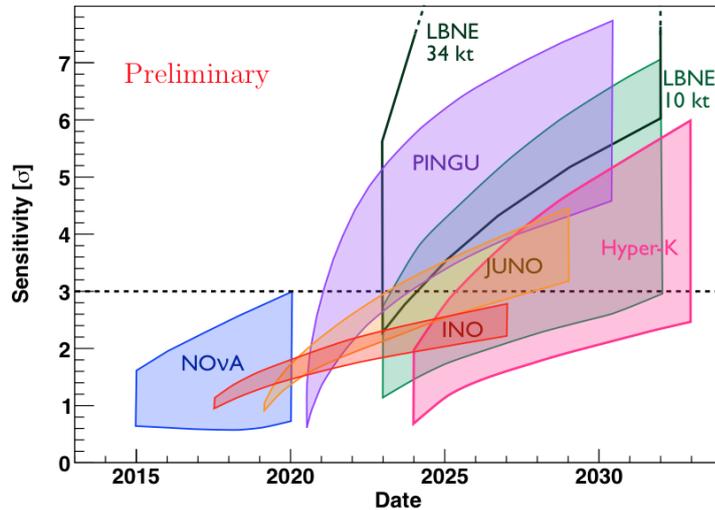


Abbildung 3.2: Vergleich der Verschiedener zukünftiger Experimente die NMH zu bestimmen. [6]

von DeepCore zu platzieren. Die PINGU DOMs, auch PDOMs genannt befinden sich dabei in dichten Abständen von 3 m zueinander in einer Tiefe von ca. 2120 m bis 2460 m kurz nach der in Kapitel 2.3 erwähnten Staubschicht.

Um die Löcher zu bohren könnten Teile der alten Technik wiederverwendet werden. Vieles muss allerdings neu angeschafft werden. So ist z.b. geplant das wiedereingefrorene Eis in den Löchern optisch klarer zu machen. Hierzu soll aus dem Schmelzwasser bis zu 85% der Luft entfernt und Verunreinigungen durch die Maschienen gefiltert werden.

3.3 PINGU-DOM (PDOM)

Für die geplanten Photosensoren von PINGU werden viele Konzepte der IceCube DOMs übernommen. So bleiben die Aufhängungen, der Penetrator, die Druckkapsel, das Gel und die PMT dieselben. Viel der in den IceCube DOMs benutzten Elektronik ist mittlerweile veraltet, daher wurde diese neu erdacht. Sie ist bei dem PDOM auf eine einzige Platine zusammengeschrumpft, ihr Energieverbrauch gesenkt und ihre Komplexität verringert worden. Die notwendige neue Software sollte dabei mit der bestehenden Datenverarbeitungssoftware so weit wie möglich kompatibel sein. In PDOM sollen ebenfalls LED Flasher sowie Kameras installiert werden. Mit ihnen soll, wie in Abbildung(3.4) angedeutet, das Locheis und die Lage der PDOMs im Raum besser werden.

Mit PINGU bietet sich eine Gelegenheit alternative Designs optischer Sensoren zu testen. Eine geringe Stückzahl dieser könnte neben den PDOMs in das Eis gebracht werden um deren Potential für IceCube-Gen2 zu prüfen.

3.4 POCAM

Die POCAM (Precision Optical CALibration Module) ist eine geplante Referenzlichtquelle zur Kalibrierung des Detektors, die an verschiedenen Stellen in PINGU platziert werden soll. Als solche sollte sie eine möglichst gut bekannte Abstrahlcharakteristik haben. Zudem sollte ein durch die POCAM erzeugter Lichtpuls auch möglichst kurz sein, zwischen 10 und 100 ns. Um jederzeit Gewissheit über die Intensität und Zeitprofil der emittierten Lichtpulse zu haben, soll die POCAM selbst mit einem Lichtsensor bestückt werden. Die azimuthale Orientierung der POCAM wird wie bei den DOMs auch zufällig sein und kann nur mit Unsicherheit bestimmt werden. Um diese Unsicherheit zu umgehen soll die Abstrahlung der POCAM möglichst homogen in 4π sein, wobei mehr Wert auf azimuthale Isotropie gelegt wird als auf zenitale.

Als Gehäuse für die POCAM wurde eine DOM-typische Druckkapsel samt Penetrator und Aufhängung gewählt. Als Lichtquelle soll eine LED dienen. Eine LED alleine entspricht nicht den gewünschten Anforderungen einer homogenen 4π Abstrahlung. Kürzliche Bemühungen konzentrierten sich darauf mittels Geant4 Simulationen einen Diffusor zu erarbeiten der den gewünschten Effekt bringt [3]. Zwei verschiedene Konzepte wurden dabei untersucht. Das eine ist eine Kugelschale aus diffus reflektierendem Material mit regelmäßig angeordneten Löchern und das andere eine halbtransparente Kugelschale. Dabei wurden bei dem einen mit verschiedener Anzahl und Größe der Löcher und bei dem anderen mit der Dicke und Transmissions/Emissions/Reflexionskoeffizienten sowie bei beiden mit dem Radius gespielt. Abbildung(3.5) zeigt beide Varianten wie sie in Geant4 konstruiert wurden.

Eine halbtransparente Kugelschale mit kleinem Radius erfüllte dabei die Anforderungen noch am besten, wobei in dieser Konfiguration der Schatten des Waistbands sehr ausgeprägt ist.

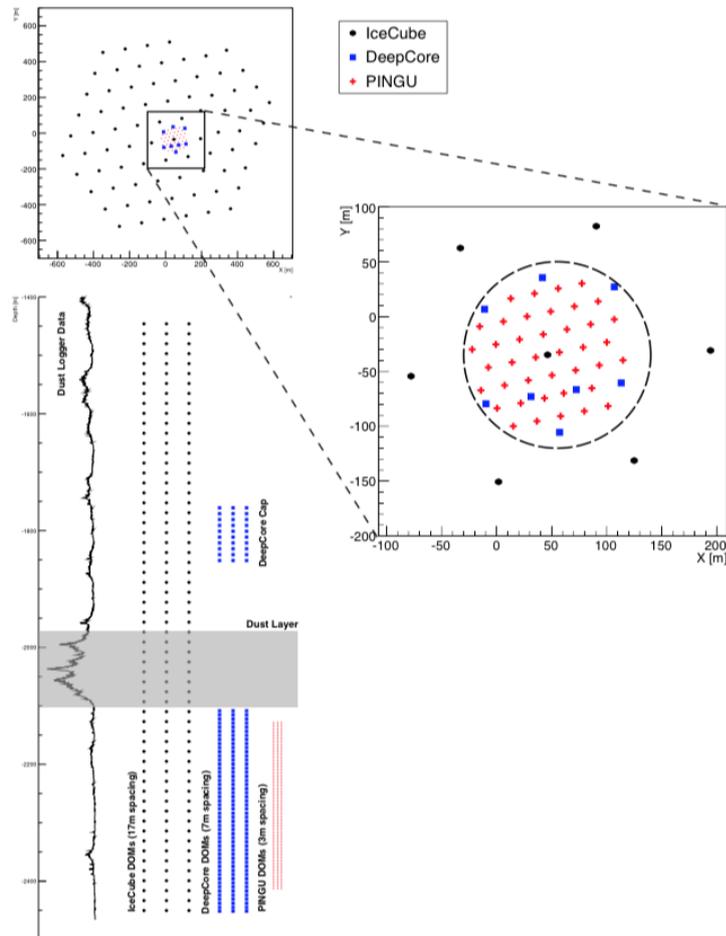


Abbildung 3.3: In der linken Hälfte sind schematische Seitenansicht und Draufsicht für Position DOMs von IceCube(schwarz), DeepCore(blau) und PINGU(rot). Am linken Rand ist die Staubkonzentration der jeweiligen Tiefe aufgetragen. Die Staubschicht ist mit dem grauen Streifen symbolisiert. Auf der rechten Hälfte ist eine Vergrößerung des für PINGU relevanten Bereichs der Draufsicht. [6]

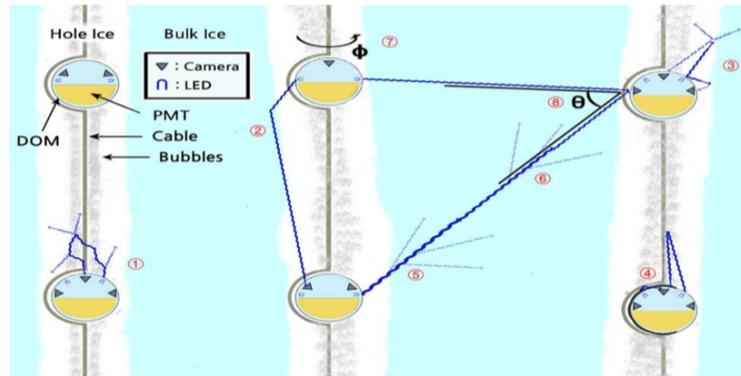


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Möglichkeiten der geplanten Kameras-LED Systems: 1) Messungen zur Photonenerstreuung in der Säule trübem Eis, 2) kartieren des Bohrlochs, 3) allgemeine Untersuchung des HoleIce auf z.B. Risse oder Verunreinigungen 4) Kabelposition, 5) Messung von Lichttransmission und Reflexion an dem Übergang zwischen dem Eis aus der Bohrung und dem natürlichen Eis, 6) Absorption und Streuung im natürlichen Eis, 7) ϕ -Orientierung der DOMs, 8) Räumliche Lage der DOMs zueinander [6]

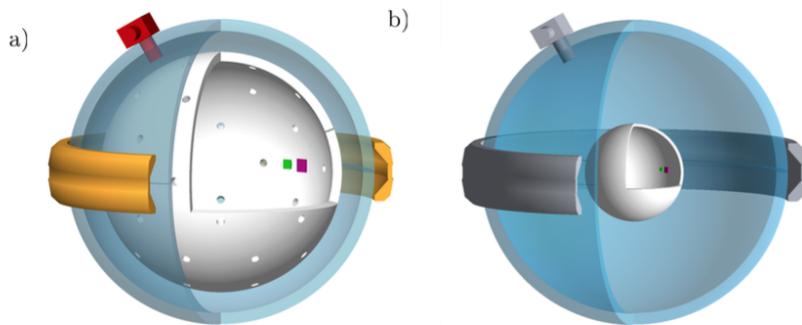


Abbildung 3.5: Die POCAM in der Geant4 Visualisierung mit zwei Designs des Diffusors(weiß): a) eine diffus reflektierende Kugelschale mit Löchern, b) eine halbtransparente Kugelschale. Im Inneren sitzt eine LED (lila) und eine Photodiode(grün). In a) sind Waistband(gelb), Penetrator(rot) Druckkapsel(hellblau) hervorgehoben. (Geant4 POCAM) [3]

Kapitel 4

Simulation einer idealisierten POCAM in PINGU

In diesem Kapitel geht es um die Simulation einer idealisierten POCAM innerhalb von PINGU. Die Simulation handelt von Photonen die sich im Eis ausbreiten und an DOMs Photoelektronen auslösen. Die benutzte Software trägt den Namen Clsim und ist IceCube intern. Mit ihr können Photonen durch ein Medium propagiert werden. Die Software unterstützt eine parallelisierte Nutzung von GPUs. Ihr übergeben werden als Input ein Eismodell, die Detektorgeometrie sowie eine Liste mit den Photonen und deren Startbedingungen. Ein Eismodell ist eine Parametrisierung der Streu und Absorptionslängen im gesamten IceCube Detektorvolumen (Kapitel 2.3). Als Eismodell wurde, wenn nicht anders angegeben, das aktuelle SpiceLea benutzt. In der Detektorgeometrie stecken Informationen zur Position und Ausmaße der DOMs sowie deren Effizienz und deren winkelabhängiger Photonenakzeptanz.

Die Position und Nummerierung der PINGU Strings ist der Abbildung(4.1) zu entnehmen. Die PDOMs werden der Tiefe nach nummeriert (beginnend von oben). Die verwendeten PDOM-Parameter entsprechen denen eines durchschnittlichen DeepCore DOMs. Als weiterer Inputparameter kann bestimmt werden, ob der Einfluss des mit Luftbläschen kontaminierten Eises aus der Bohrung mitberücksichtigt wird. Dieser Parameter wird im Folgenden mit HoleIce oder HoleIce Parameter bezeichnet. Das HoleIce ist, wenn nicht anders angegeben, berücksichtigt. Als Ergebnis liefert Clsim Listen mit der Anzahl der an den DOMs ausgelösten Photoelektronen und deren Zeiten. Die Zahl der an ausgelösten Photoelektronen wird im Folgenden mit Hits bezeichnet. Das Wellenlängenspektrum der generierten Photonen entspricht dem einer $405nm$ LED. Um das Detektorvolumen möglichst gleichmäßig auszu-leuchten wurde die POCAM (Photonenquelle) auf der Position des PDOMs 48 an String 88 platziert. Die idealisierte POCAM ist in diesen Simulationen realisiert durch Photonen die zufällig auf einer Kugel mit Radius 50 cm generiert werden. Diese Photonen zeigen zudem senkrecht weg von der Kugel.

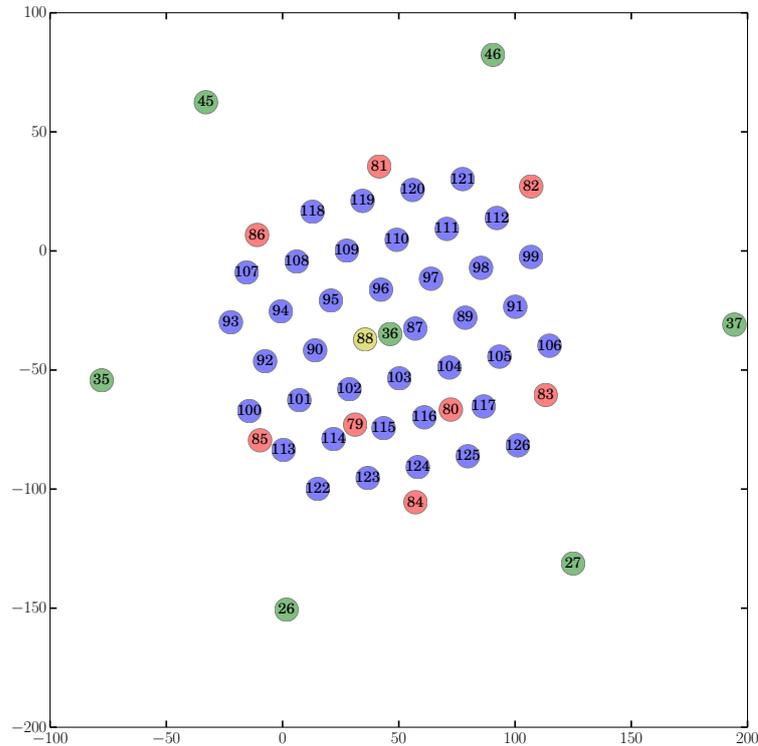


Abbildung 4.1: Position und Nummerierung der PINGU Strings (blau). Die simulierte POCAM befindet sich an String 88 (gelb). Rot markiert sind DeepCore Strings und in grün die IceCube Strings. Die Achsenbeschriftung ist in Metern

Clsim bestimmt den entsprechenden Wahrscheinlichkeiten nach zufällig ob ein Photon:

- gestreut wird und in welche Richtung (Streulänge)
- absorbiert wird (Absorptionslänge)
- beim Erreichen eines DOM-Volumes ein Photoelektron ausgelöst wird (winkelabhängige Photonenakzeptanz und DOM-Effizienz)

Daher ist es nötig möglichst viele Photonen zu propagieren, um ausreichende Gewissheit über die Mittelwerte von Interesse, hier Hits, zu bekommen. Typischerweise werden bei 10^8 propagierten Photonen ca. 100 Hits an einem horizontal benachbarten DOM gezählt. Da ein poissonverteilter Wert dieser Größe einen relative Unsicherheit von ca. 10% hat, wurden in allen Simulationen, 200 unabhängige Events mit je 10^8 Photonen simuliert um die Unsicherheit der Mittelwerte zu verbessern. Die Berechnung einer Simulation dieser Größenordnung dauert dabei typischerweise etwa eine

Stunde. Die einzige Ausnahme bilden die Simulationen zur Photonengruppierung im nächsten Kapitel (Einfluss zu starker Photonengruppierung).

4.1 Einfluss zu starker Photonengruppierung

Die Rechenzeit, die Clsim benötigt, kann verringert werden, indem mehrere Photonen in Gruppen zusammengefasst werden. Wobei jedes Photon einer Gruppe eigen propagiert wird. Dies geschah während des Generierens der Photonen. Dabei besteht eine Gruppe aus Kopien eines einzigen Photon. Die Anzahl an Photonen in einer Gruppe wird im Folgenden als Gruppengröße GG bezeichnet. Dabei besteht die Gefahr nicht genügend Photonen mit unterschiedlicher Startrichtung/Position zu generieren und somit den statistischen Fehler vermeidbar zu vergrößern. Zudem scheinen sich Gruppengrößen ab 10^5 merklich negativ auf die Rechenzeit auszuwirken. Es ist daher wichtig, zu testen welche Zahl an Photonen unterschiedlicher Anfangsrichtung nötig ist bzw. welche GG nicht überschritten werden sollte, um keine merkliche Veränderung des Ergebnisses mehr zu erhalten. Bei ausreichender Anzahl an Photonen mit zufälliger Richtung ist die Erwartung, dass die Hits an zwei gleich weit entfernten Strings gleich ist, bis auf zu kleine Abweichungen durch die räumliche Asymmetrie der Eiseigenschaften, da ihre DOMs denselben Abstand zur Quelle und dieselben Effizienzen etc. besitzen.

Hierzu wurden jeweils 10^8 Photonen generiert und die GG von 10 Photonen beginnend stets um den Faktor 10 vergrößert bis 10^7 . Abbildung(4.2) zeigen die Hits der PDOMs zweier benachbarter Strings bei denen sich zeigt wie deutlich der Einfluss eine zu großen GG sein kann.

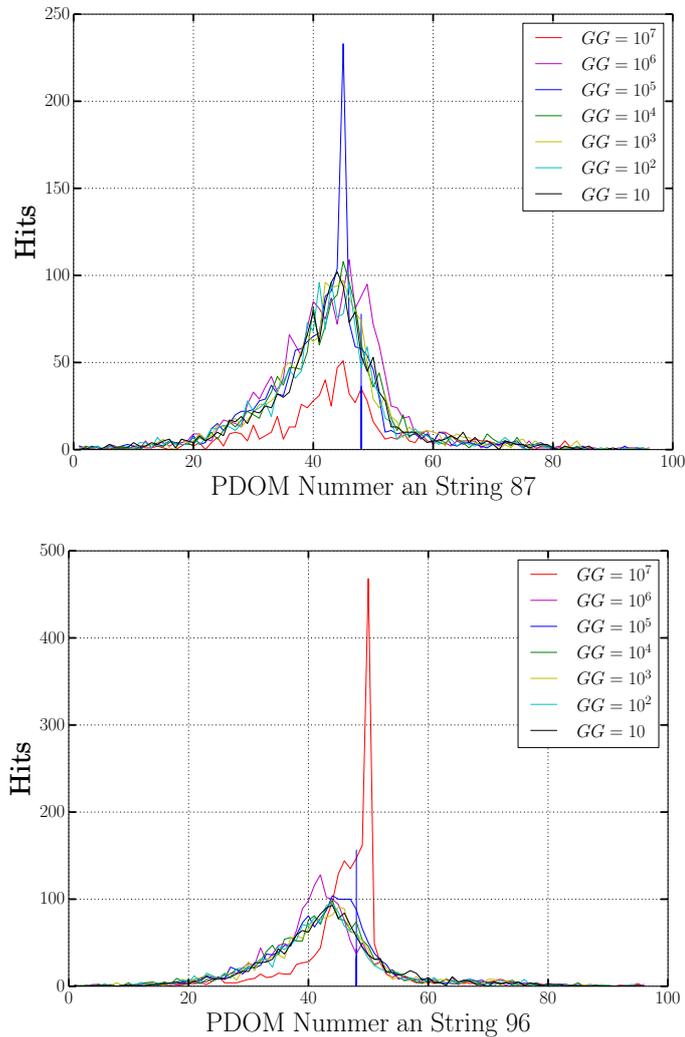


Abbildung 4.2: Hits der PDOMs entlang zweier benachbarter Strings 87 (oben) und 96 (unten). Der Abstand des Strings zur POCAM beträgt 22 m. Die vertikale blaue Linie symbolisiert die Position der POCAM.

Zu sehen ist das bei einer GG von 10^5 bei String 87 an einem PDOM knapp zweieinhalb mal so viele Hits gesehen wurden verglichen mit der 10^2 Simulation (Abbildung(4.2) oben). Bei String 96 hat bei der 10^7 Simulation ein unterhalb liegender PDOM extrem viele Hits gezählt (Abbildung(4.2) unten). In diesem Fall hat vermutlich ein oder mehrere Photonengruppen in die unmittelbare Nähe des PDOMs gezeigt. Mit abnehmender GG sinken wie zu erwarten die Unterschiede zweier Simulationen.

Eine Gruppengröße von 10^3 Photonen bei 10^8 Photonen gesamt gibt ausreichende Statistik. Diese Gruppengröße wird in den weiteren Simulationen beibehalten und wird nicht mehr erwähnt.

4.2 Einfluss des HoleIce Parameters

Es ist zu wenig über die Beschaffenheit des HoleIce bekannt um es als solches in die Simulation zu implementieren. Realisiert wird das HoleIce in Clsim durch eine Anpassung der winkelabhängigen Photonenakzeptanz. Diese wird über 4π verschmiert, sodass auch von oben auf einen DOM treffende Photonen einen Hit auslösen können. Zugleich wird dadurch die Akzeptanz von unten kommenden Photonen verringert.

Diesen Effekt kann man gut anhand der Hit Statistik der auf einer Linie liegenden Strings 87, 89 und 91 in Abbildung(4.3) sehen. Mit wachsender Entfernung zur POCAM wird der Effekt kleiner. DOMs die unterhalb und seitlich der Quelle liegen sehen mit HoleIce mehr Licht als oberhalb liegende, oberhalb liegende sehen dagegen weniger. Besonders stark ausgeprägt ist der Effekt bei den PDOMs des POCAM String(88) in Abbildung(4.4). Die Photoelektronenausbeute des gesamten PINGU Detektors ist mit HoleIce größer (Abbildung(4.5)). Der Vergleich zweier Strings gleichen Abstands zur POCAM zeigt, dass man denselben Effekt beobachten kann, egal in welcher Richtung die Strings liegen (Abbildung(4.6)).

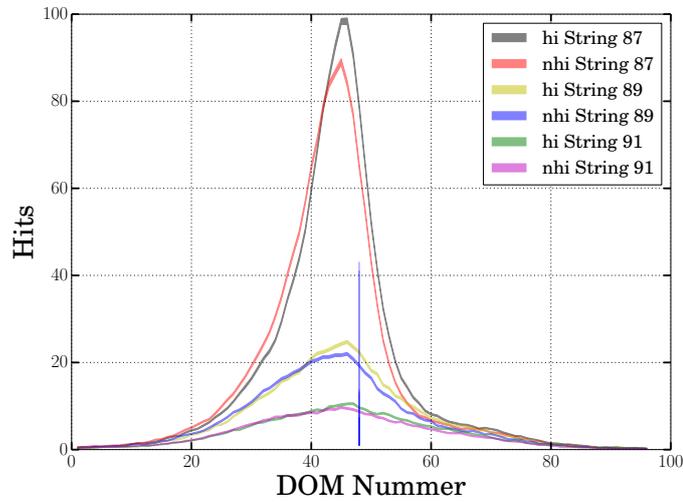


Abbildung 4.3: Mittlere Hits der PDOMs entlang der Strings 87 89 und 91 mit Unsicherheitsbereichen, ohne (nhi) und mit (hi) HoleIce. Der Abstand der Strings zur POCAM steigt jeweils um 22 m. Die vertikale blaue Linie symbolisiert die Position der POCAM.

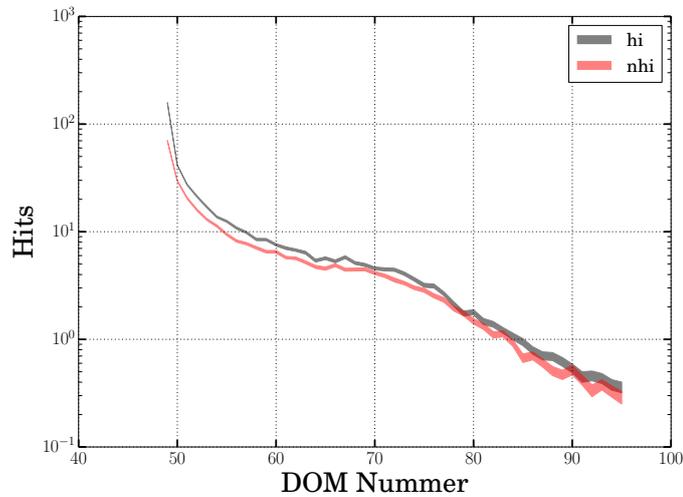


Abbildung 4.4: Mittlere Hits der PDOMs unterhalb der POCAM entlang des POCAM String 88 mit Unsicherheitsbereich, ohne (nhi) und mit (hi) HoleIce. Hits sind logarithmisch aufgetragen.

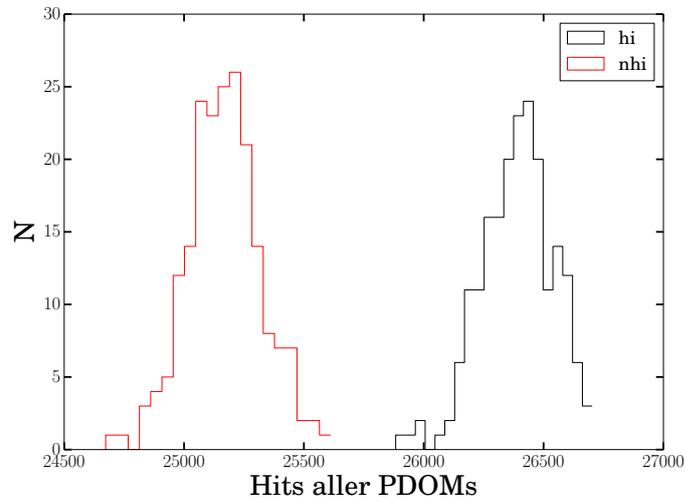


Abbildung 4.5: Summe aller in PINGU gezählten Hits pro Event ohne (nhi) und mit (hi) HoleIce.

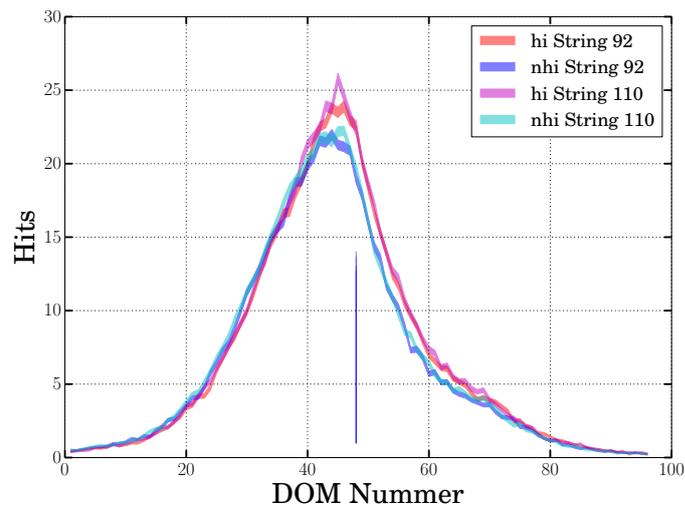


Abbildung 4.6: Mittlere Hits der PDOMs entlang der Strings 92 und 110 mit Unsicherheitsbereichen, ohne (nhi) und mit (hi) HoleIce. Der Abstand beider Strings zur POCAM beträgt 44 m. Die vertikale blaue Linie symbolisiert die Position der POCAM.

4.3 Auswirkungen zweier verschiedener Eismodelle

Ein Ziel der POCAM ist es, die optischen Eigenschaften des Südpoleises besser zu bestimmen. Eine erste grobe Abschätzung ob und inwieweit mit einer idealen POCAM Eiseigenschaften vermessen werden können, ist der Vergleich von unterschiedlichen Eismodellen in der Simulation. Als Vergleich dient das ältere Eismodell SpiceMie 2.3, bei dem noch keine azimutale Anisotropie berücksichtigt wurde.

Bei dem benachbarten String 87 ist kaum ein Unterschied zu sehen (Abbildung(4.7)). Bei dem weiter entfernten String 89 zählen mit SpiceMie PDOMs auf Höhe der POCAM deutlich weniger Hits. Dieser Effekt ist bei dem noch weiter entfernten String 91 nur noch andeutungsweise zu erkennen. Bei zwei gleich weit von dem POCAM String entfernten Strings ist der Effekt bei beiden in ähnlicher Stärke zu sehen (Abbildung(4.9)). Man kann zudem erkennen, dass wie zu erwarten im Gegensatz Gegensatz zu SpiceLea zwei Strings gleicher Entfernung mit SpiceMie gleich viele Hits zählen. Dieselben Ergebnisse liefern Simulationen ohne das HoleIce. Die im gesamten PINGU Detektor gezählten Hits (Abbildung(4.8)) sind bei SpiceMie etwas geringer, jedoch überschneiden sich beide Verteilung fast.

Änderungen im Eismodell führen zu kleinen aber dennoch sichtbaren Unterschieden. Daher ist Grund zur Annahme, dass mit POCAM eine Verbesserung des Eismodells möglich sein wird.

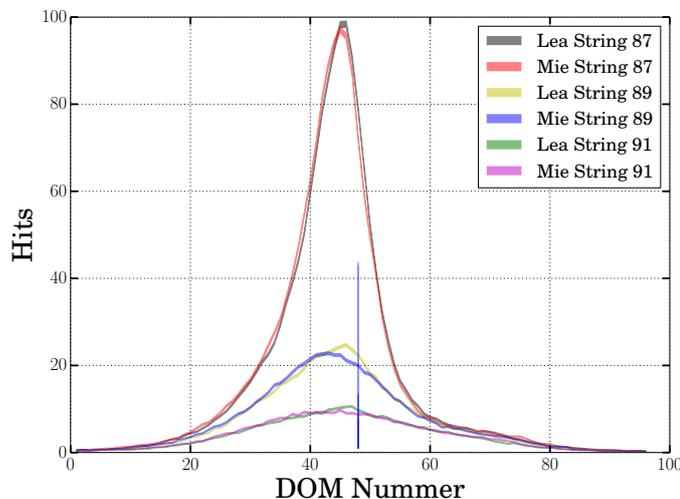


Abbildung 4.7: Mittlere Hits der PDOMs entlang der Strings 87 89 und 91 mit Unsicherheitsbereichen. Im Vergleich stehen die Eismodelle SpiceMie und SpiceLea. Der Abstand der Strings zur POCAM steigt jeweils um 22 m. Die vertikale blaue Linie symbolisiert die Position der POCAM.

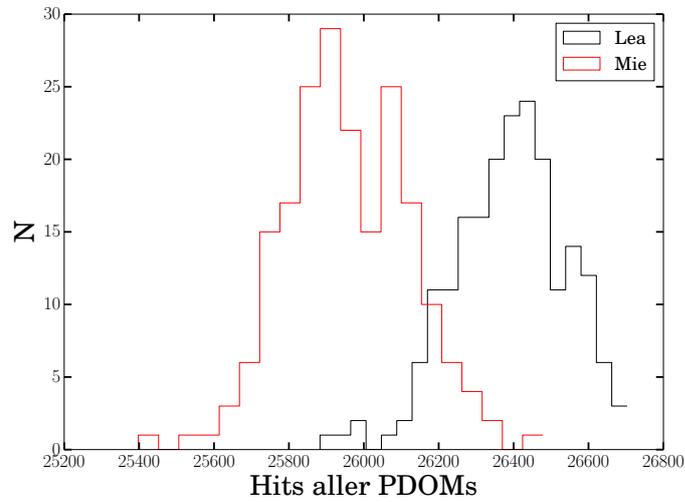


Abbildung 4.8: Summe aller in PINGU gezählten Hits pro Events. Im Vergleich stehen die Eismodelle SpiceMie und SpiceLea.

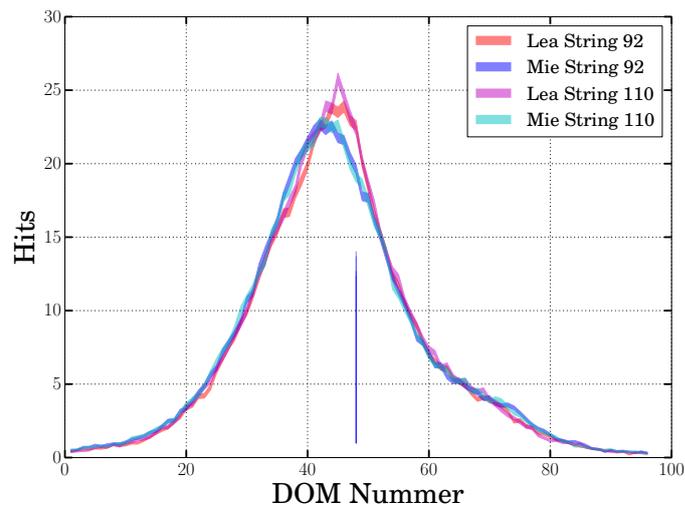


Abbildung 4.9: Mittlere Hits der PDOMs entlang der Strings 92 und 110 mit Unsicherheitsbereichen. Im Vergleich stehen die Eismodelle SpiceMie und SpiceLea. Der Abstand beider Strings zur POCAM beträgt 44 m. Die vertikale blaue Linie symbolisiert die Position der POCAM.

4.4 Auswirkung variierter PDOM-Effizienzen

Mehrere Effekte haben Einfluss darauf wie viel von dem Licht das auf einen DOM trifft den Photomultiplier erreicht. Die erste Hürde ist der Übergang von Eis, welches sich, wenn auch nur geringfügig, an jedem DOM unterscheidet, auf Glas. Dann von Glas in auf Gel und von diesem auf die PMT. Keine der Grenzflächen ist perfekt und so gibt sich für jeden DOM eine Eigenheit. Zudem gibt es Schwankungen in der Quantenausbeute der Photomultiplier der DOMs. Daher wird im realen Detektor jedem DOM eine individuelle Effizienz und gegebenenfalls weitere Eigenheiten zugesprochen.

Es wurde eine Simulation durchgeführt, bei der die Effizienz aller DOMs um 10% verringert ist. Dabei verringern sich wie erwartet die Zahl der gezählten Hits an den einzelnen DOMs (Abbildung(4.11)) und somit auch im gesamten PINGU Detektor um 10% (Abbildung(4.13)). Die Hits skalieren wie erwartet linear mit der DOM-Effizienz.

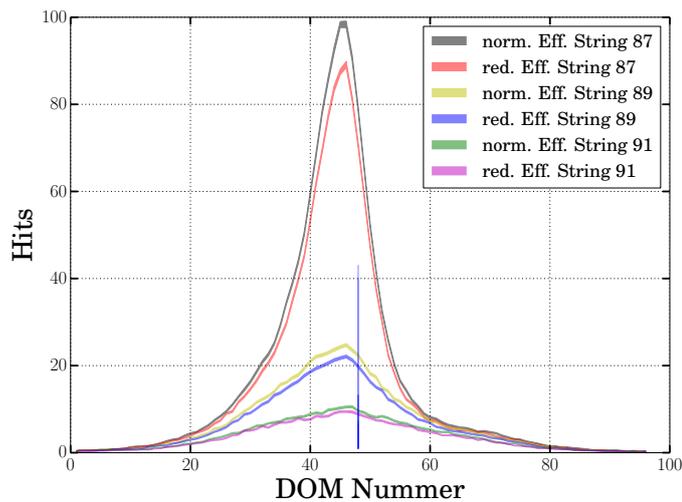


Abbildung 4.10: Mittlere Hits der PDOMs entlang der Strings 87 89 und 91 mit Unsicherheitsbereichen mit um 10% reduzierten (red.Eff.) und unveränderten (norm. Eff.) Effizienzen. Der Abstand der Strings zur POCAM steigt jeweils um 22 m.

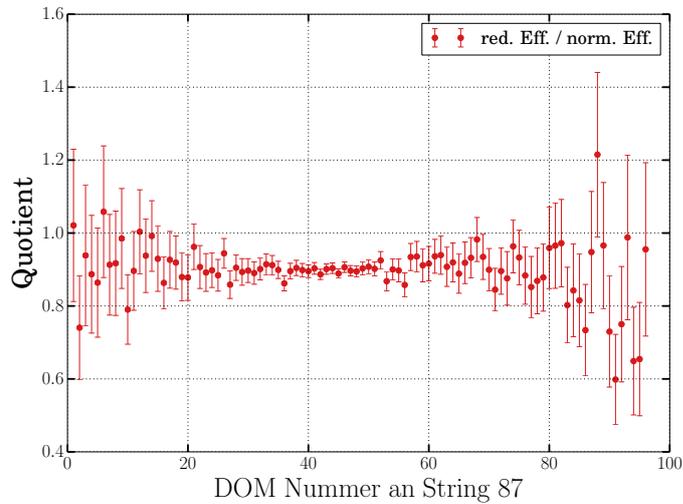


Abbildung 4.11: Verhältnis zwischen den mittleren Hits der PDOMs entlang String 87 der Simulation mit 10% reduzierten (red.Eff.) und der unveränderten (norm. Eff.) Effizienzen.

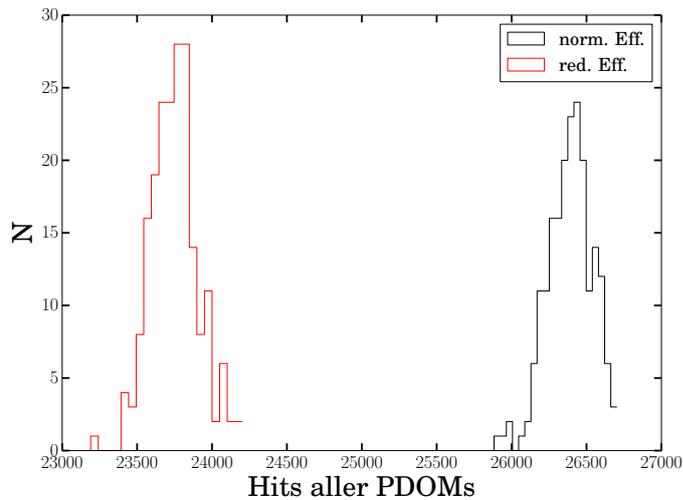


Abbildung 4.12: Summe aller in PINGU gezählten Hits pro Event mit um 10% reduzierten (red.Eff.) und unveränderten (norm. Eff.) Effizienzen.

Weiter wurde eine Simulation angefertigt, bei der die Effizienz eines jeden PDOMs für sich variiert. Die Werte sind um den ursprünglichen Wert verteilt. Diese Variation der Effizienzen ist gut in der Simulation erkennbar (Abbildung(4.14) und

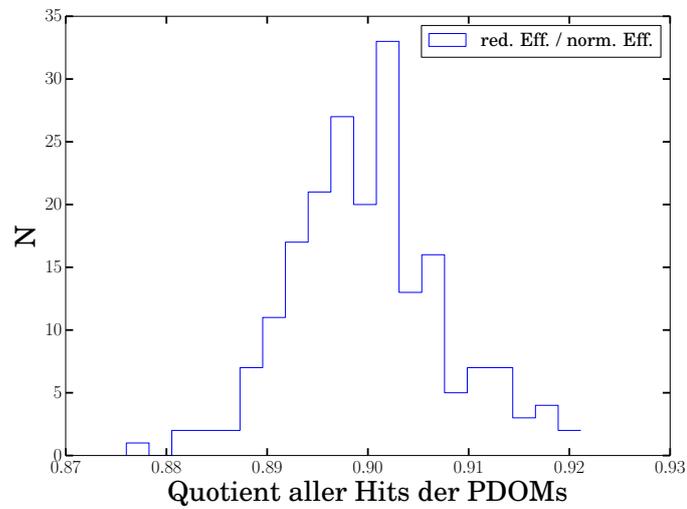


Abbildung 4.13: Verhältnis der Summe aller in PINGU gezählten Hits pro Event von um 10% reduzierten (red.Eff.) und unveränderter (norm. Eff.) Effizienzen.

(4.15)). Die Gesamtzahl der von PINGU gesehenen Hits bleibt wie zu erwarten gleich (Abbildung(4.16)), da PDOMs verringerter Effizienzen durch PDOMs vergrößerter Effizienzen beim Aufsummieren ausgeglichen werden.

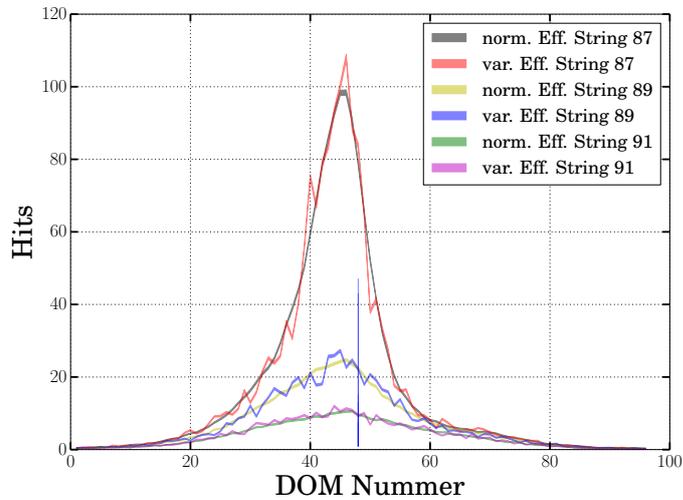


Abbildung 4.14: Mittlere Hits der PDOMs entlang der Strings 87 89 und 91 mit Unsicherheitsbereichen mit variierten Effizienzen (var. Eff.) und unveränderten (norm. Eff.) Effizienzen. Der Abstand der Strings zur POCAM steigt jeweils um 22 m. Die vertikale blaue Linie symbolisiert die Position der POCAM.

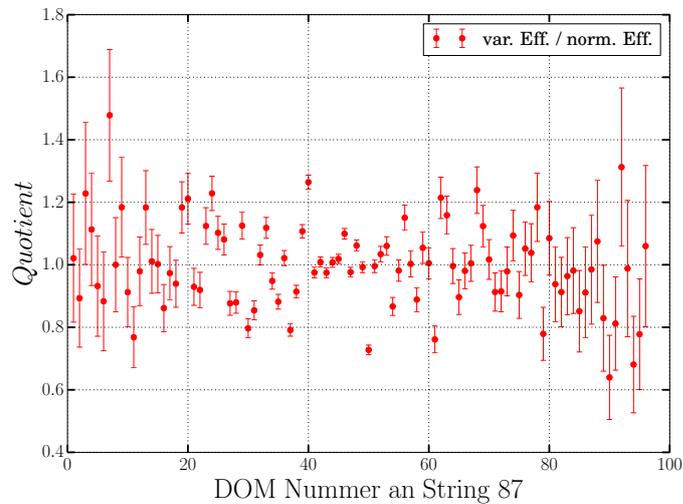


Abbildung 4.15: Verhältnis zwischen den mittleren Hits der PDOMs entlang String 87 der Simulation mit variirten (var.Eff.) und der unveränderter (norm. Eff.) Effizienzen.

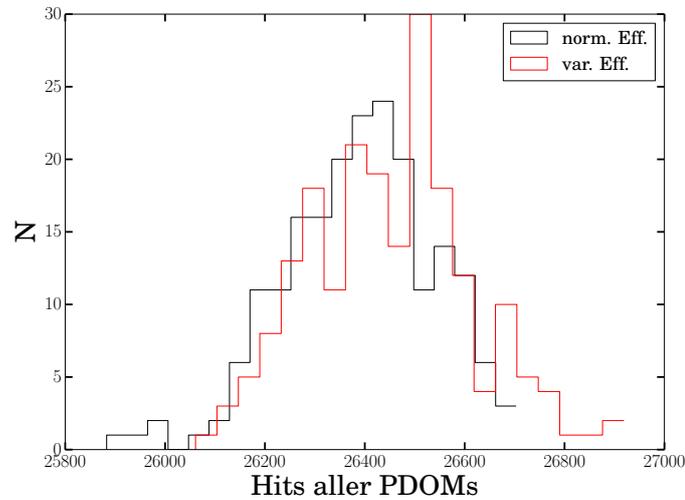


Abbildung 4.16: Summe aller in PINGU gezählten Hits pro Event mit variierten Effizienzen (var. Eff.) und unveränderten (norm. Eff.) Effizienzen.

4.5 Waistband Realisierung

Die Annahme einer komplett isotropen Photonenabstrahlung wird dem aktuellen Design der POCAM nicht gerecht. Die größte Störung kommt von den in Kapitel(3.4) beschriebenen Waistband und dem Penetrator. Um die Simulation dem aktuellen Design näher zu kommen und die Auswirkungen der Waistbandschattens zu studieren, wurde das Waistband beim generieren der Photonen implementiert. Es wurden nur Photonen generiert die nicht im Schatten des Waistbands liegen. Der Schattenbereich ist ein zur vertikalen Achse rotationssymmetrisches sowie zum Horizontebene spiegelsymmetrisches Band. Dessen Breite über den zenitalen Öffnungswinkel definiert sind. Dabei wurde die Gesamtzahl der Photonen so an die Größe des Waistbands angepasst, sodass die Photonendichte auf der Kugeloberfläche gleich der der idealen POCAM ist. Dadurch ist ein direkter Vergleich ohne Normierung möglich.

Es wurden Simulationen für verschiedene Größen des Waistbands bis zu einer Größe von 25° gefertigt. Der Schatten den das Waistband wirft ist deutlich zu sehen.

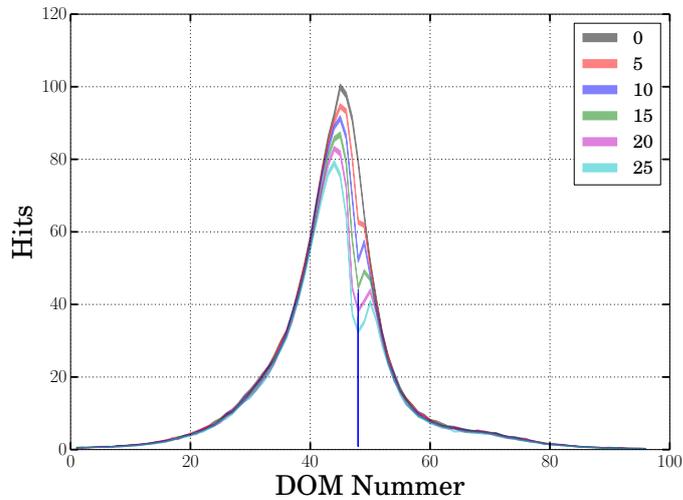


Abbildung 4.17: Mittlere Hits der PDOMs entlang des Strings 87 bei unterschiedlichen Waistbandgrößen, mit Unsicherheitsbereichen. Der Abstand der Strings zur POCAM beträgt 22 m.

Im aktuellen Design der POCAM nimmt das Waistband 22° ein. Die Auswirkungen dieser Einstellung auf den benachbarten String 87 ist in Abbildung (waistband2String87) zu sehen. Die Auswirkungen des Waistbands sind groß.

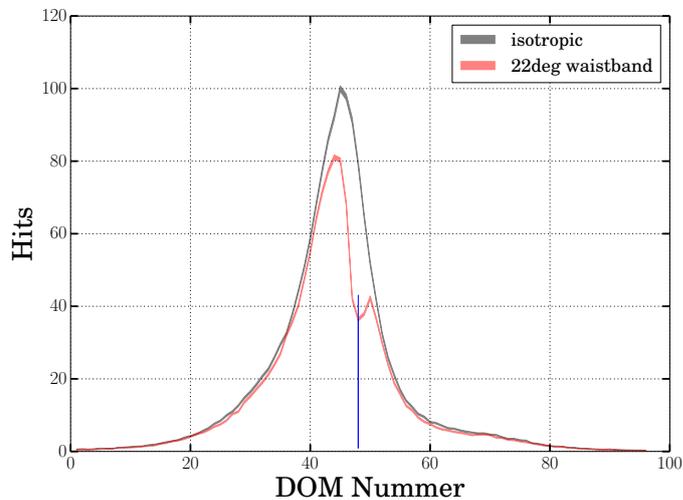


Abbildung 4.18: Mittlere Hits der PDOMs entlang des Strings 87 bei unterschiedlichen Waistbandgrößen, mit Unsicherheitsbereichen. Der Abstand der Strings zur POCAM beträgt 22 m.

Kapitel 5

Ergebnisse und Ausblick

In dieser Arbeit habe ich die Antwort des PINGU Detektors auf eine idealisierte POCAM untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass es in der Simulation möglich ist verschiedene Eismodelle zu unterscheiden sowie Variationen der DOM-Effizienzen zu sehen. Der HoleIce-Parameter hat deutlichen Einfluss auf das Ergebnis. Bei Simulationen mit unterschiedlich großen Waistbandschatten wird deutlich, dass Störungen der Isotropie der POCAM große Wirkung haben.

Um dem realen Detektor näher zu kommen wäre das Simulieren der Elektronik ein nächster Schritt. Darunter fällt, die analogen Signale welche die ausgelösten Photoelektronen in der PMT erzeugen sowie deren Noise zu simulieren und diese anschließend zu Triggern und zu Digitalisieren. Schließlich müssen Algorithmen entworfen werden, der die Gegebenheiten der Simulation (Abstand der DOMs, Eismodell und DOM-Effizienzen) rekonstruiert. Die Qualität dieser Rekonstruktion könnte dann genauere Aufschlüsse über das Potential der POCAM geben.

Derweil kann anstelle der idealisierten POCAM die Abstrahlcharakteristik der Geant4 Simultaionen genutzt werden um Anforderungen an Isotropie und Zeitprofil der POCAM genauer zu studieren.

Literatur

- [1] C. Xu. ‘Chemical composition of primary cosmic rays with IceCube’. Diss. University of Delaware, 2012.
- [2] R. Abbasi. ‘Calibration and Characterization of the IceCube Photomultiplier Tube’. type. institution, 2010.
- [3] Kilian Holzapfel. ‘Entwicklung eines optischen Präzisionskalibrations-Moduls für IceCube-Gen2’. Technische Unisversität München, 2015.
- [4] Dmitry Chirkin. ‘Evidence of optical anisotropy of the South Pole ice’. In: (2013).
- [5] M.G. Aartsen u. a. ‘Measurement of South Pole ice transparency with the IceCube LED calibration system’. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 711 (Mai 2013), S. 73–89. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213001460>.
- [6] M. G. Aartsen u. a. ‘Letter of Intent: The Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU)’. In: (2014). arXiv: 1401.2046 [physics.ins-det].
- [7] L. Wolfenstein. ‘Neutrino oscillations in matter’. In: *Phys. Rev. D* 17 (9 Mai 1978), S. 2369–2374. DOI: 10.1103/PhysRevD.17.2369. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.17.2369>.
- [8] S.P. Mikheyev und A.Yu. Smirnov. ‘Resonant neutrino oscillations in matter’. In: *Progress in Particle and Nuclear Physics* 23 (1989), S. 41–136. ISSN: 0146-6410. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0146-6410\(89\)90008-2](http://dx.doi.org/10.1016/0146-6410(89)90008-2). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0146641089900082>.
- [9] Kai Krings. ‘Studies on the Measurement of Atmospheric Neutrino Oscillations with the PINGU Detector’. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen.

Danksagungen

Mein erster Dank geht an Elisa Resconi. Ich bin froh darüber, neben einem Menschen gearbeitet zu haben, der zu jeder Zeit eine so heitere Atmosphäre ausgestrahlt hat.

Ich danke Martin Jurkovic für viele Tipps und Hilfen im Bezug auf diese Arbeit und speziell der Handhabung der Rechenmaschine, sowie viele Diskussionen, die oft auch über den Rahmen des Themas hinausgingen.

Ich danke Kai Krings, Joost Vennkamp und Stefan Coender für hilfreiche Diskussionen und Feedback.

Am Ende möchte ich meinem Cousin Maximilian, meinem Bruder Tom, meiner Mutter Daniela und meinen Freunden Corinna, Julia, Alex und Fritz für ihre seelische Unterstützung danken.