Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Bachelorarbeit

Implementation von LEDs in eine Geant4-Simulation des mDOM-Sensors für das IceCube Upgrade und Simulationsstudien zu deren Emissionsprofil

Autor:
Anna-Sophia Tenbruck

Gutachter:
Prof. Dr. Alexander Kappes
Dr. Alfons Khoukaz

Wissenschaftliche Arbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science

AG Kappes
Institut für Kernphysik

13. April 2022

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über „Implementation von LEDs in eine Geant4-Simulation des mDOM-Sensors für das IceCube Upgrade und Simulationsstudien zu deren Emissionsprofil“ selbstständig von mir und ohne fremde Hilfe verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind. Mir ist bekannt, dass es sich bei einem Plagiat um eine Täuschung handelt, die gemäß der Prüfungsordnung sanktioniert werden kann.

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in einer Datenbank einverstanden.

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit oder Teile daraus nicht anderweitig als Prüfungsarbeit eingereicht habe.

Ort, Datum	Unterschrift

Anna-Sophia Tenbruck
Institut für Kernphysik
Wilhelm-Klemm-Str. 9
Westfälische Wilhelms-Universität
48149 Münster
Matr. Nr. 464 489
a_tenb09@uni-muenster.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Neutrinos **2**
2.1 Neutrinos im Standardmodell 2
2.2 Neutrinoquellen 2
2.3 Wechselwirkung mit Materie 3
2.4 Detektion durch Cherenkov-Strahlung 3

3 IceCube Neutrino Detektor **6**
3.1 IceCube Upgrade 7
3.2 Das multi-PMT digital optical module 7
3.3 Kalibrationsgeräte 8
3.4 Eiseigenschaften am Südpol 12

4 Geant4-Simulation **14**
4.1 Geant4 Simulationssoftware 14
4.1.1 Geometrie in Geant4 14
4.1.2 Physikalische Prozesse 14
4.2 mDOM-Modell 15

5 Luftblase **17**
5.1 Entstehung von Luftblasen im Gel 17
5.2 Luftblasen in Geant4 18
5.3 Einfluss einer Luftblase 20

6 Implementation der LEDs in Geant4 **26**
6.1 Erweiterung des mDOM-Modells 26
6.1.1 LED-Körper 26
6.1.2 Emissionsprofil - vom Experiment zur Simulation 28
6.2 Bedingungen an und Toleranz der LEDs 35
6.3 Grenzflächen und Brechungsindizes 38

7 Simulationsstudien **39**
7.1 Einfluss des Einbaus 40
7.2 Änderung des Profils mit dem Abstand 40
7.2.1 Eis als mDOM-Umgebung 42
7.2.2 Luft als mDOM-Umgebung 47
7.3 Variation des Abstands LED - Glasfenster 50
7.4 Einfluss des Mediums zwischen LED und Glasfenster 51
7.5 LED verkippt 54

8 Zusammenfassung und Ausblick **59**

A Anhang **64**

1 Einleitung

Mit der Entdeckung der Neutrinooszillationen im Jahr 1998 kippte das bis dato erfolgreiche Standardmodell der Teilchenphysik und bis heute wird an der Erweiterung diesen geforscht [1]. Neutrinos gelten im Standardmodell als masselos, wobei durch die Neutrinooszillationen bestätigt werden konnte, dass sie eine endliche Ruhemasse besitzen [2]. Die Elementarteilchen sind elektrisch neutral geladen und unterliegen als Leptonen nur der schwachen Wechselwirkung. Aufgrund des verschwindend kleinen Wirkungsquerschnitts von Neutrinos mit jeder Art von Materie, können diese viele Lichtjahre zurücklegen, ohne von elektromagnetischen Feldern abgelenkt zu werden, oder Sterne wie die Sonne nahezu ungehindert verlassen. Sie dienen damit als wichtige Boten *ferner Welten* und bringen weitreichende Informationen über das innere von Sternen, Supernovas oder galaktischen Ereignissen. Trotz der großen Anzahl bringen ihre Wechselwirkungseigenschaften die große Herausforderung mit, sie zu detektieren. Detektoren großen Volumina sind daher erforderlich.
Neben einigen weiteren Neutrinodetektoren ist IceCube das größte Neutrinoobservatorium weltweit [3]. Der Kubikkilometer große Teilchendetektor befindet sich am Südpol in Tiefen zwischen 1450 m und 2450 m antarktischen Eis eingelassen und wurde erbaut, um hochenergetische Neutrinos aus astrophysikalischen Quellen zu detektieren [4]. Neutrinos können nicht direkt beobachtet werden. Wechselwirken sie allerdings mit dem umgebenden optischen Medium, erzeugen sie elektrisch geladene Sekundärteilchen, die wiederum Cherenkov-Licht emittieren [4]. IceCube nutzt diese Methode, um Neutrinos nachzuweisen, in dem installierte optische Module dieses Licht detektieren [3].
Der Ausbau von IceCube zu IceCube-Gen2 mit acht Kubikkilometer soll die Nachweisrate der Neutrinos um das zehnfache erhöhen [4]. Mit IceCube Upgrade, der Gen2-Vorphase, werden unter anderem neue optische Module wie die *multi-PMT digital optical modules* (kurz mDOM) im Detektorkern implementiert [5]. Mit IceCube Upgrade werden ebenfalls neue Kalibrationsgeräte, unter anderem Leuchtdioden (kurz LEDs), implementiert, welche das Wissen über die optischen Eigenschaften des Polareises und der Detektorreaktion vertiefen sollen [6].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Emissionsprofils der in IceCube Upgrade installierten LEDs. Die durchgeführten Studien basieren auf einem Modell des mDOMs in der Simulationssoftware Geant4. Ein Teil dieser Arbeit ist die Erweiterung des Modells um diese LEDs und ein Verfahren, um zukünftig jedes beliebige Emissionsprofil in die Simulation einsetzen zu können. Ein Verständnis der Abstrahlcharakteristik der installierten LEDs ist unabdingbar, um die Eiseigenschaften am Südpol zu extrahieren und die Kalibrationsfähigkeit des IceCube Detektors zu verbessern.
Ein weiterer Bestandteil dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses einer Luftblase auf die Sensitivität des Moduls. Solche Luftblasen können sich im Modul auf nicht kontrollierbare Weise bilden.

2 Neutrinos

Neutrinos sind Elementarteilchen und gehören zu der Gruppe der Leptonen im Standardmodell [2]. Sie sind elektrisch ungeladen und tragen eine sehr geringe Masse. Die Detektion der Neutrinos erfolgt nicht direkt, sondern über Sekundärteilchen, welche in einem dielektrischen Medium - wie Wasser oder Eis - Cherenkov-Strahlung produzieren. Dieses Kapitel umfasst die Eigenschaften, Wechselwirkung und Detektion von Neutrinos.

2.1 Neutrinos im Standardmodell

Das Standardmodell der Teilchenphysik umfasst zwei Arten elementarer Teilchen, aus denen die uns bekannte Materie aufgebaut ist: Quarks und Leptonen [2]. Beide treten in jeweils drei Familien auf und sind Fermionen. Die Neutrinos gehören zu der Gruppe der Leptonen, welche nicht an der starken Wechselwirkung teilnehmen. Als die einzigen elektrisch neutralen Teilchen aller Fermionen, unterliegen sie auch nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung. Neutrinos wechselwirken nur über die schwache Wechselwirkung[1].
Die Kräfte zwischen den Teilchen werden durch Austauschbosonen vermittelt. Für die schwache Wechselwirkung sind das die W^+-, W^-- und Z^0 - Bosonen. Reaktionen, die über den Austausch von $W^\pm$ - Bosonen verlaufen, werden geladene Ströme genannt. Solche, die über den Austausch der Z^0 - Bosonen verlaufen, werden als neutrale Ströme bezeichnet. Nach dem Standardmodell gelten die Neutrinos als masselos. Jedoch ist bekannt, dass sie eine geringe Masse besitzen. Sie treten in drei Arten (engl. *flavours*) auf: Elekton-Neutrino ν_e, Myon-Neutrino ν_μ und Tau-Neutrino ν_τ. Dieser Lepton-Flavour ist bei den Neutrinos keine Erhaltungsgröße. Dieses Phänomen der periodische Änderungen des Flavours von Neutrinos in Zeit und Raum ist als Neutrinosozillationen bekannt. Die Entdeckung der Neutrinooszillation[2] bestätigte, dass Neutrinos eine endliche Masse besitzen (s. hierzu in [1]).

2.2 Neutrinoquellen

Die Eigenschaften der Neutrinos bewirken ein nahezu ungestörtes Durchdringen der Materie, weshalb die Herkunft und damit auch das Energiespektrum der Neutrinos breit gefächert sind.
Neutrinos können je nach ihrer Quelle in Reaktor- und Beschleuniger Neutrinos, solare, atmosphärische oder kosmische Neutrinos eingeteilt werden [7]. So entstehen sie beispielsweise aus der Reaktion der geladenen kosmischen Strahlung mit Atomkernen in den oberen Schichten der Erdatmosphäre oder in Fusionsreaktionen in Sternen wie der

[1] Aufgrund der geringen Masse, kann die gravitative Wechselwirkung vernachlässigt werden.
[2] 1998 durch Kamiokande. Nobelpreis für die Entdeckung

Sonne [2]. Aus dem Weltall treffen die kosmischen Neutrinos auf die Erde aus verschiedenen Quellen wie Supernovaes, Neutronensterne oder aktiven galaktischen Kernen. Durch ihren geringen Wirkungsquerschnitt können sie nahezu ungehindert aus dem Innern kompakter Himmelskörper entweichen.

2.3 Wechselwirkung mit Materie

Die Neutrinoeigenschaften machen es unmöglich, Neutrinos direkt zu detektieren, weshalb dies über Sekundärteilchen geschieht, welche entstehen, wenn ein Neutrino mit der Materie interargiert. Bei Energien ($> 10\,\mathrm{GeV}$) werden diese Wechselwirkungen von tiefinelastischer Streuung dominiert. Die tiefinelastische Streuung erfolgt entweder über den sogenannten geladenen oder neutralen Strom [2]:

$$\nu_l + N \xrightarrow{Z^0} \nu_l + X, \quad \nu_l + N \xrightarrow{W^\pm} l + X, \tag{1}$$

wobei ν_l das am Nukleon gestreute (Anti-)Neutrino darstellt und in das entsprechend geladene (Anti-)Lepton $l = e, \mu, \tau$ umgewandelt wird. N ist dabei ein Proton oder ein Neutron und X ein hadronisches Restprodukt der Interaktion, das aus einem oder mehreren Hadronen besteht.
Bezeichnend dabei ist, dass die streuenden (Anti-)Neutrinos ν_l in Gleichung 1 selbst nicht detektiert werden können, allerdings die dabei entstehenden Produkte $l \in e, \mu, \tau$ schon.

2.4 Detektion durch Cherenkov-Strahlung

Wie bereits erwähnt können die Neutrinos nicht direkt detektiert werden, sondern nur über die geladenen Sekundärteilchen. Die in IceCube genutzte Methode ist der Nachweis über den Cherenkov-Effekt [3].
ßßDer Cherenkov-Effekt greift, wenn sich ein elektrisch geladenes Teilchen durch ein dielektrisches Medium bewegt und seine Geschwindigkeit v_c dabei größer als die Lichtgeschwindigkeit c_0/n in diesem Medium ist, wobei c_0 die Vakuumlichtgeschwindigkeit und n der Brechungsindex des Mediums ist [8]. Die geladenen Teilchen induzieren Dipole entlang ihrer Flugbahnen. Durch die sich zeitlich verändernde Dipolmomente, wird elektromagnetische Strahlung emittiert. Ist das geladene Teilchen dabei langsamer als die Lichtgeschwindigkeit im Medium ($v < c_0/n$), interferieren die Wellen, welche von umliegenden Atomen ausgesandt werden, destruktiv miteinander. Ist die Geschwindigkeit v des Teilchens hingegen schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Medium ($v > c_0/n$), können sich die Elementarwellen von verschiedenen Punkten der Flugbahn an bestimmten Orten konstruktiv überlagern und Cherenkov-Strahlung entsteht. Diese Cherenkov-Strahlung wird in Form eines Kegels mit dem Öffnungswinkel θ relativ zu Flugbahn des geladenen Teilchens emittiert. Dieses Phänomen ist analog zu der Er-

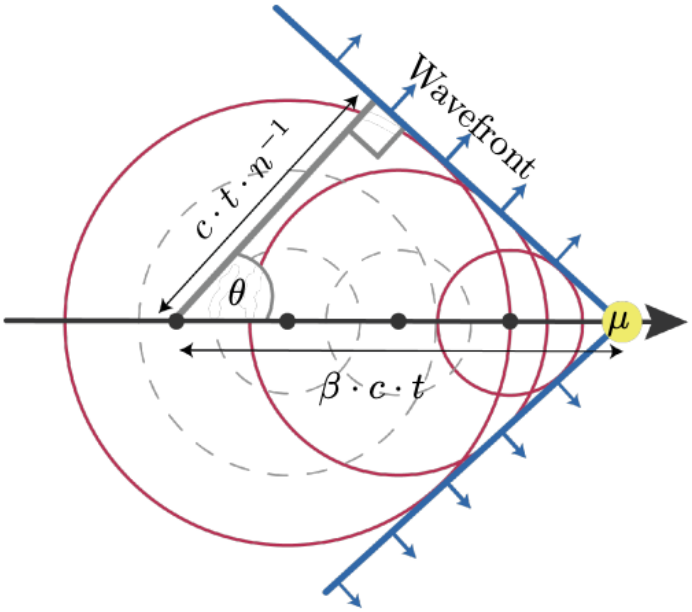


Abbildung 1: Schematische Skizze eines Myons μ beim Durchqueren eines Dielektrikums und der dabei emittierten Cherenkov-Strahlung (in blau dargestellt). Entnommen aus [9]

.

zeugung eines Mach'schen Schallkegels, wie er im Fall von Schallwellen beispielsweise bei Überschallflugzeugen beobachtet werden kann. Abbildung 1 zeigt eine Momentaufnahme von Kugelwellen entlang einer Teilchenbahn. Die Strecke, die das geladene Teilchen in der Zeit t zurücklegt, berechnet sich nach [8] über $\beta \cdot c_0 \cdot t = v \cdot t$, wobei v die Geschwindigkeit des Teilchens ist. In der selben Zeit legt die zum Zeitpunkt $t = 0$ ausgesandte Elementarwelle die Strecke $(c_0/n) \cdot t$ zurück. Anhand der Skizze kann damit der Öffnungswinkel (auch Cherenkov-Winkel genannt) θ einfach berechnet werden:

$$\cos\theta = \frac{(c_0/n) \cdot t}{v \cdot t} = \frac{1}{\beta \cdot n}. \tag{2}$$

Dabei hängt $n = n(\lambda)$ von der Wellenlänge λ der emittierten Cherenkov-Photonen ab. Da die Teilchengeschwindigkeit maximal die Vakuumlichtgeschwindigkeit erreichen kann (dann ist $\beta = 1$), lässt sich der maximale Winkel der Cherenkov-Strahlung wie folgt berechnen:

$$\cos\theta_{\max} = \frac{1}{n}. \tag{3}$$

Der maximale Cherenkov-Winkel ist damit nur abhängig vom durchlaufenden Medium. Von einem bestimmten Punkt auf einer Teilchentrajektorie ausgehend liegt die Richtung der Strahlung auf einem Kegel mit Öffnungswinkel θ. Innerhalb und außerhalb des Kegels existiert keine Strahlung. Mit zunehmender Teilchengeschwindigkeit wird der Kegel immer größer, bis zum maximalen Winkel $\theta_{\max}$ [8].
Mithilfe der Cherenkov-Strahlung können die geladenen Leptonen, welche bei der Wechselwirkung von Neutrinos mit der Materie entstehen (s. Gl. 1), sichtbar gemacht werden. Elektromagnetische und hadronische Schauer können durch ein im geladenen Strom

entstandenes Elektron oder Positron oder durch eine beim neutralen Strom induzierte hadronische Kaskade entstehen (vgl. Gl. 1). Die dabei entstandenen Teilchen bewegen sich in alle Richtungen, so dass die hinterbliebene Signatur im Detektor nahezu sphärisch ist.

Diese Art von Signaturen werden als *Shower* bezeichnet [9]. Die Elektronen verlieren im Dielektrikum auf einer sehr kurzen Strecke Energie durch Bremsstrahlung und können aufschauern. Durch die Streuung ist das Muster unscharf. Da die geladenen Teilchen ihre Energie über eine relativ kurze Strecke im Medium deponieren, kann aus solch einem *Shower* präziser die Energie des Neutrinos rekonstruiert werden, weniger jedoch die Richtung des Neutrinos. Myonen hingegen besitzen eine viel höhere Masse als die Elektronen und haben dadurch eine größere mittlere freie Weglänge. Dabei entsteht eine lange Spur von Cherenkov-Strahlung. Diese Signale werden als *Tracks* bezeichnet. Aus diesen Signaturen lässt sich mit einer sehr guten Winkelauflösung die Richtung des einfallenden Neutrinos bestimmen. Ein einfallendes Tau-Neutrino erzeugt einen hadronischen Schauer im Medium und emittiert zudem ein Tauon, das nach sehr kurzer Zeit zerfällt und einen zweiten Teilchenschauer erzeugt [9]. Das Signal dieser Prozesse wird als *Double Bang* bezeichnet. Die Energie der Neutrinos kann durch die Lichtintensität der Cherenkov-Strahlung ermittelt werden. Die Signaturen der genannten Prozesse sind in Abbildung 2 dargestellt.

Der IceCube Detektor nutzt diese Methode für den Nachweis von Neutrinos. Im folgenden Kapitel wird der Detektor und seine Hauptmerkmale besprochen.

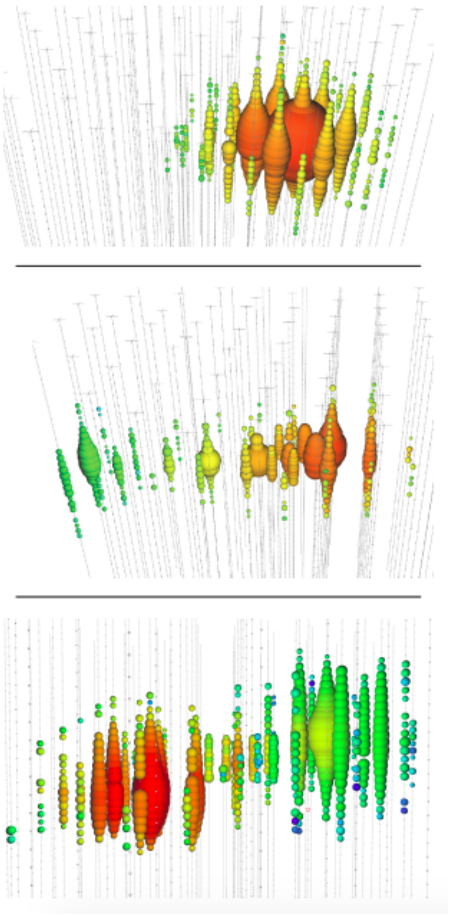


Abbildung 2: Signaturen von einem *Shower* (oben), *Track* (Mitte) und *Double Bang* (unten). Die Farbe repräsentiert den Zeitpunkt der Detektion (blau: früh, rot: spät), während die Größe der einzelnen Kugeln die Anzahl der detektierten Photonen veranschaulicht. Entnommen aus [9]

3 IceCube Neutrino Detektor

Das IceCube Neutrino Observatorium am geographischen Südpol stellt den derzeit weltweit größten Neutrino Detektor dar. Der Detektor ist der Nachfolger von AMANDA[3][10]. Ein Hauptziel von IceCube ist der Nachweis hochenergetischer Neutrinos astrophysikalischer Quellen, um so Aufklärung über die Entstehung kosmischer Strahlung zu erhalten [11]. Eine Skizze des Detektors ist in Abbildung 3 dargestellt. IceCube nutzt 1 km^3 antarktisches Gletschereis als Cherenkov-Medium für den Nachweis sekundär geladener Teilchen, die durch Wechselwirkungen der Neutrinos mit dem Eis entstehen [11]. Das Cherenkov-Licht wird über 5160 digitale optische Module (engl. *digital optical module*, kurz DOM) an 86 Strängen detektiert. 4680 davon sind in einer Tiefe von 1450 m bis 2450 m in einem Abstand von 17 m vertikal zueinander an 78 Strängen angeordnet. Diese 78 Stränge haben einen horizontalen Abstand von 125 m zueinander. Die restlichen optischen Sensoren sind im Zentrum des Detektors in DeepCore an 8 zusätzlichen Strängen mit 72 m horizontalem Abstand zu finden. Die DOMs haben dabei einen vertikalen Abstand von nur 7 m zueinander. DeepCore befindet sich in einer Tiefe von 2100 m bis 2450 m. Durch die engere Anordnung der Stränge wird die Schwelle der Neutrinoenergie, ab die der Detektor messen kann, gesenkt, außerdem ist es dadurch möglich, Neutrinooszillationen zu messen. Der IceCube Detektor registriert Neutrinos ab 100 GeV bis wenige PeV, wobei mit DeepCore Neutrinos im Größenbereich ab 10 GeV nachgewiesen werden können [13].

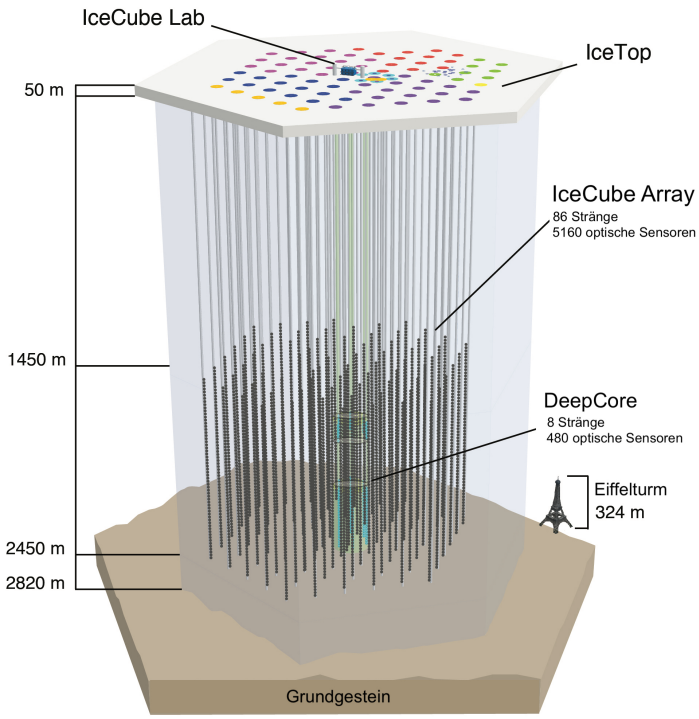


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Aufbaus des IceCube Neutrino Observatoriums. Entnommen aus [12], modifiziert.

Ein weiterer Bestandteil von IceCube ist das IceTop an der Oberfläche, direkt über dem Detektor. Dies stellt ein eigenes Experiment zur Untersuchung von kosmischer Strahlung dar, dient zusätzlich jedoch als Veto für IceCube für den Nachweis nach unten gehender Neutrinos [3].

[3] Antartic Muon And Neutrino Detection Array. In Betrieb von 1995 bis 2009.

Seit seiner Inbetriebnahme im Jahr 2011 konnten mit IceCube viele neue Erkenntnisse in der Hochenergie-Astrophysik, einschließlich der Entdeckung eines Flusses hochenergetischer Neutrinos kosmischen Ursprungs sowie der zeitlich und gerichteten Korrelation von Neutrinos mit einem Blazar gemacht werden [14, 6, 15].
Um Neutrinos jedoch bei einem niedrigeren oder höheren Energiespektrum wie bisher nachzuweisen, ist IceCube-Gen2 - eine Erweiterung des Detektors - geplant. IceCube-Gen2 soll eine Detektorfläche von $8\,\mathrm{km}^3$ haben, wobei die zusätzlichen Stränge weiter auseinander angebracht werden sollen, um so die Untersuchung von Neutrinos mit Energien im PeV bis EeV Bereich zu ermöglichen [5]. Teil der Erweiterung stellt IceCube Upgrade dar, um Neutrinos im niederenergetischen Bereich nachzuweisen.

3.1 IceCube Upgrade

IceCube Upgrade stellt eine Vorphase von IceCube-Gen2 dar [6]. Dabei beträgt das Detektorvolumen weiterhin $1\,\mathrm{km}^3$, im Zentrum des Detektors kommen jedoch 7 weitere Stränge mit etwa 700 neuartigen optischen Sensoren hinzu. Die Sensoren liegen enger beieinander (20 m horizontal x 3 m vertikal) in einer Tiefe zwischen 2150 m und 2425 m, wo das Eis am klarsten und der atmosphärische Myonenhintergrund niedriger ist [6]. Die dichtere Anordnung der Stränge ermöglicht eine verbesserte Leistung des Detektors bei niedrigen Energien. Durch das Upgrade wird es möglich sein, die besten Messungen in Neutrinooszillationen zu erhalten sowie die Nachweisrate für atmosphärische Neutrinos um einen Faktor von zehn zu erhöhen [16]. Abbildung 4 zeigt einen Überblick über IceCube und dem Upgrade. Die blauen Punkte stellen IceCube dar, die grünen zeigen im Zentrum des Detektors DeepCore und die roten Punkte kennzeichnen die 7 zusätzlichen Stränge durch das Upgrade. Rechts in der Abbildung sind zudem die vertikalen Abstände zwischen den optischen Modulen skizziert.
Mit IceCube Upgrade werden neue und verbesserte Module sowie Kalibrationsgeräte instrumentiert. Sie wurden entwickelt, um die Detektionseffizienz sowie die Kalibrierfähigkeit des Detektors zu verbessern.

3.2 Das multi-PMT digital optical module

Das Herzstück der DOMs in IceCube ist ein 10 Zoll großer nach unten gerichteter Photomultiplier (kurz PMT) [3]. Ein Photomultiplier wandelt ein einfallendes Photon durch Ausnutzung des Photoelektrischen Effekts in einen messbaren Spannungspuls um. Eines der für die Erweiterung von IceCube entwickelten Module stellt das multi-PMT digital optical module (kurz mDOM) dar [17]. Die mDOMs kommen in IceCube Upgrade zum Einsatz und bestehen aus 24 3 Zoll PMTs, dessen Richtungen über das gesamte Modul verteilt sind. Dadurch wird zum einen die photosensitive Fläche vergrößert, ferner wird durch die Anordnung der PMTs eine nahezu über den ganzen Raumwinkel verteilte Winkelakzeptanz sowie Informationen über die Richtung der einfallenden Photonen erreicht. Da jedes Modul über mehre PMTs verfügt, welche einzeln ausgelesen werden

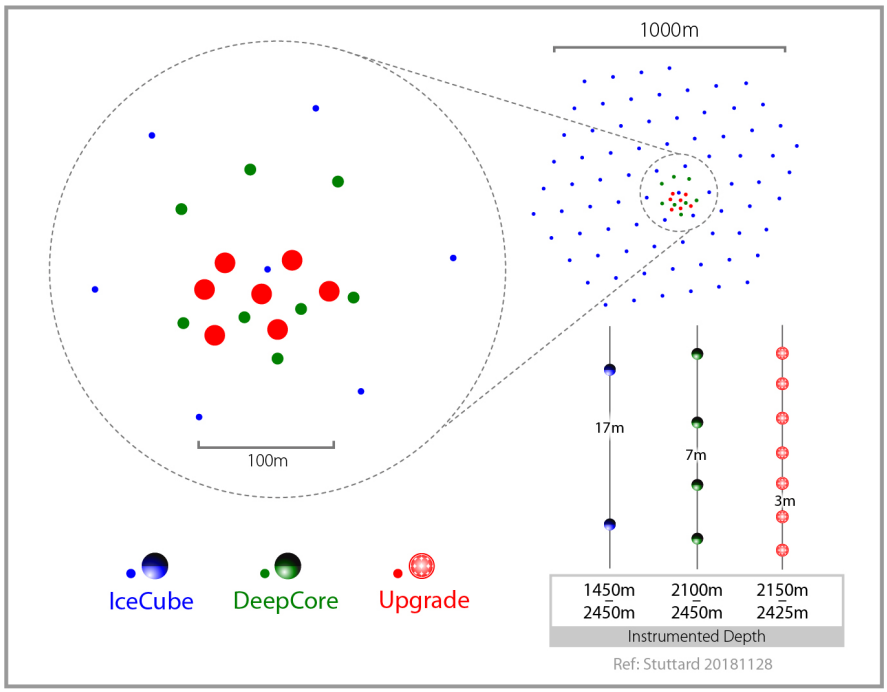


Abbildung 4: IceCube Upgrade. Links ist ein Ausschnitt des IceCube Detektors zu sehen (blaue Punkte), mit DeepCore in der Mitte (grün) und den sieben neuen Strängen durch Upgrade (rot). Rechts sind die vertikalen Abstände der optischen Module angegeben. Entnommen der IceCube-Collaboration.

können, verfügt das Modul dazu über eine intrinsische Richtungssensitivität, welche die Winkelauflösung des gesamten Detektors verbessert.
Das Gehäuse der mDOMs bilden zwei Hemishpären aus Borosilikatglas, die jeweils in einen kurzen zylindrischen Teil übergehen. Dieser Glasdruckbehälter schützt die inneren Komponeten. Die 24 PMTs sind in eine Polyamid-Haltestruktur eingebettet, welche über eine Gelschicht, die als optischer Koppler dient, mit dem Druckbehälter verbunden ist. Zur Erhöhung der sensitiven Fläche, sind um jeden PMT konische Reflektoren aus Aluminium angebracht. Die Ansteuerung der Photomultiplier erfolgt über eine Platine, welche zwischen den Hemisphären sitzt. Die aufgenommenen Daten werden über ein Anschlusskabel (engl. *penetrator cable assembly*, kurz PCA) über eine Öffnung in der oberen Hemisphäre nach außen geführt. In Abbildung 5 ist das mDOM mit seinen Hauptbestandkomponenten zu sehen.
Neben den PMTs beherbergt jedes mDOM noch einige Komponenten zur Kalibrierung, welche im Folgenden erläutert werden.

3.3 Kalibrationsgeräte

Für die Rekonstruktion der Neutrinos im Detektor müssen genaue Kenntnisse des Polareises sowie der Geometrie des Detektors vorliegen. Werden die optischen Module an den Trossen in die Eislöcher herabgelassen, frieren die Löcher schnell wieder zu.

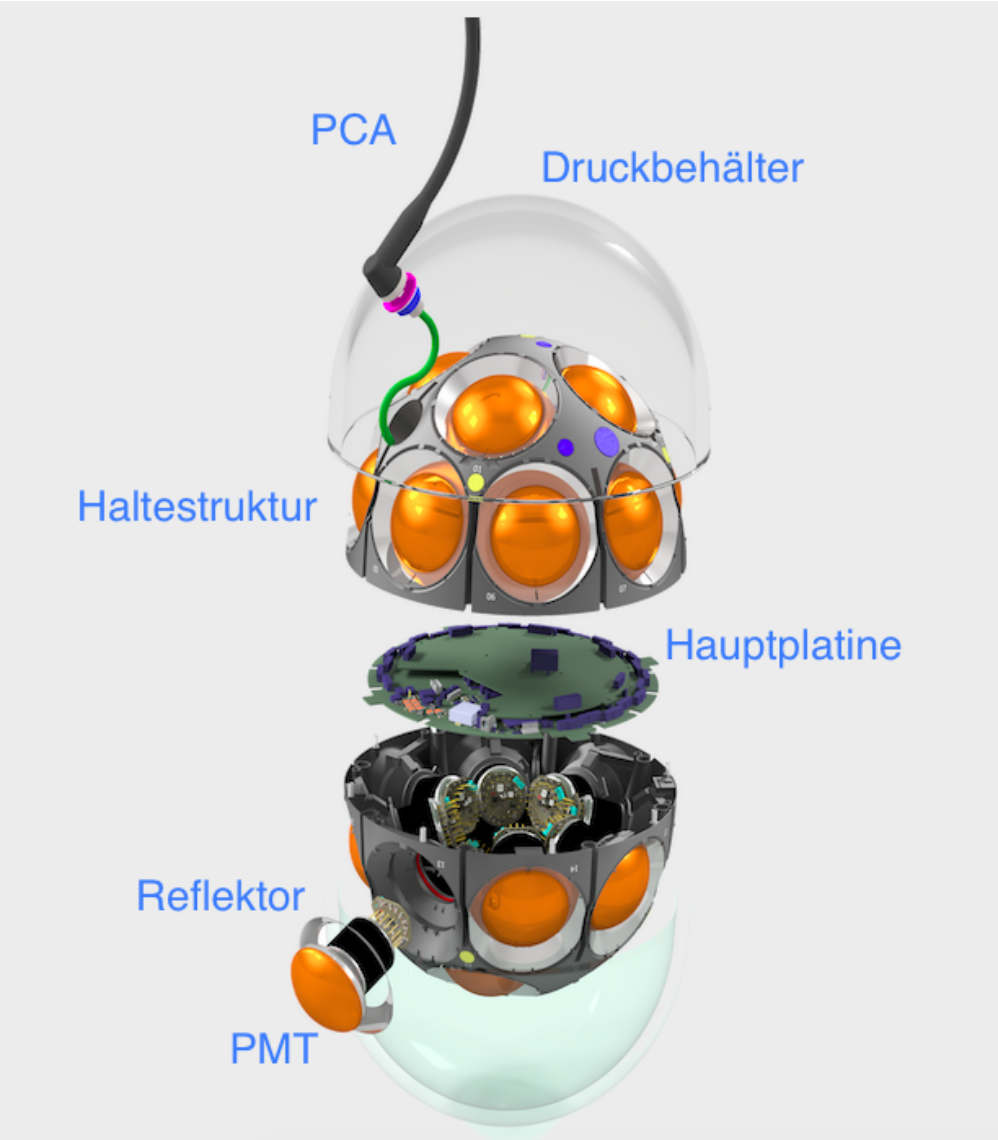


Abbildung 5: mDOM in Explosionsansicht mit seinen Hauptbestandkomponenten. Entnommen der IceCube-Collaboration, modifiziert.

Eine Schwierigkeit dabei ist die Positionsungenauigkeit der optischen Module nach der Einsetzung. Diese macht etwa 10 % der gesamten Unsicherheit auf die Richtungsrekonstruktion hochenergetischer Myonen aus [18]. Mit IceCube Upgrade werden nicht nur verbesserte optische Module implementiert, sondern auch ein neues Kalibrierungssystem integriert.
Die Leuchtdioen (kurz LED, engl. *light-emitting diode*) sind dabei nur eines der Kalibrationsgeräte. Zu den integrierten zählen die LEDs, optische Kameras sowie Druck-, Temperatur- , Magnetfeld- und Beschleunigungssensoren [6]. Hinzu kommen Einzelgeräte (engl. *stand-alone*) für die Kalibrierung des Gletschereises und die Detektorreaktion:

- „POCAM“ (engl. *Precision Optical Calibration Module*) ist ein optisches Modul,

das eine isotrope Lichtquelle mit mehreren Wellenlängen und Photodioden, zur eigenen Messung, darstellt [19].

- „Pencil Beam“ ist ein optisches Modul mit zwölf LEDs geringen Strahldurchmessers [20].
- Akustische Sensoren. Sie sind besonders sinnvoll, da akustische Signale größere Distanzen als optische zurücklegen und ihre Ergebnisse unabhängig von optischen Gegebenheiten des Polareises sind [21].

Die optischen Kameras sind besonders hilfreich bei der Auswertung der Bedingungen im Eis der Löcher. Sie wurden entworfen, um die Streuung des Lichts im Eis unter der Verwendung von rückgestreutem Licht eines Beleuchtungssystmens, welches für die Kameras ausgelegt ist, zu messen [22]. In Abbildung 6 ist unter anderem die Position der Kamera sowie des Beleuchtungssystems dieser in blau zu sehen.

Die LEDs dienen als künstliche und kontrollierbare Lichtquelle im Detektor, dessen Wellenlänge und anfängliche Richtung bekannt ist. Dadurch können Messungen der Eiseigenschaften sowie das *Timing* und die Empfindlichkeit der PMTs durchgeführt werden, in dem gezielt LEDs eines Moduls Licht emittieren, welches von den PMTs eines anderen Moduls detektiert wird. Aus der Propagationszeit der Photonen kann somit beispielsweise auf die Entfernung der optischen Module geschlossen werden. Die LEDs sollen insbesondere Kenntnisse über die folgenden Punkte liefern:

- Verifizieren der zeitlichen Reaktion der (m)DOMs in der gesamten Ausleseelektronik.
- Messen der Position der (m)DOMs in den zugefrorenen Löchern.
- Messen der Eiseigenschaften.
- Überprüfung der Funktion der (m)DOMs nach dem Installieren sowie die Überprüfung, ob die (m)DOMs richtig miteinander verbunden sind, ebenfalls nach dem Einsetzen in die Eislöcher.

Die DOMs in IceCube verfügen über zwölf LEDs, welche auf einem *flasher board* jeweils paarweise angeordnet sind. Die Paare sind in sechs verschiedenen Azimutwinkeln (mit 60° Abstand zueinander) radial nach außen gerichtet, wobei die LEDs in den Paaren wiederum entlang zweier verschiedener Zenitwinkel (horizontal und 48° nach oben) angeordnet sind [11]. Die Gesamtleistung jeder LED reicht von 10^6 bis 10^{10} Photonen pro Impuls [11].

Mit IceCube Upgrade und den neuen optischen Modulen werden auch die Kalibrationsgeräte optimiert. Jedes mDOM verfügt nun über insgesamt zehn LEDs, wobei fünf

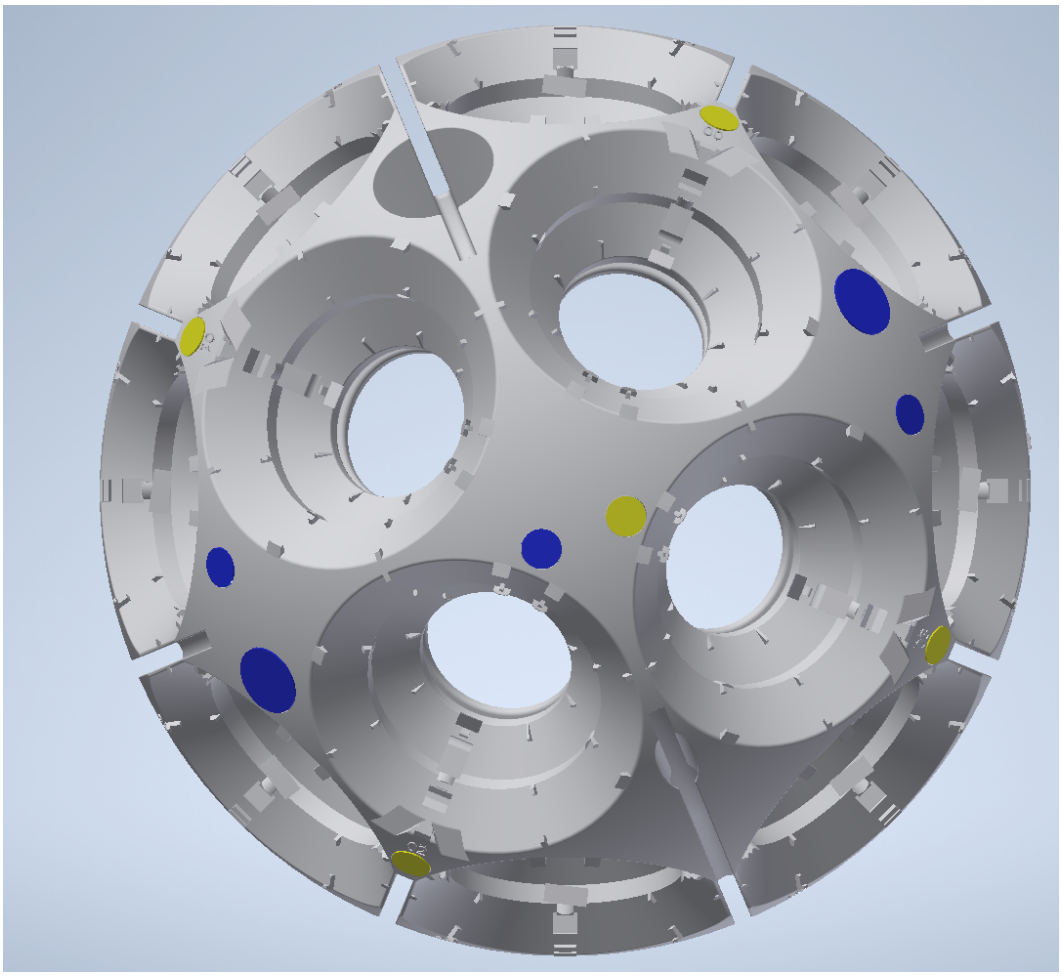


Abbildung 6: Hemissphäre der Haltestruktur aus einem 3D-Modell. Der Blick fällt von oben auf die Halbkugel. In gelb sind die Positionen der polaren und der vier äquatorialen LEDs markiert. Die blauen Punkte stellen unter anderem die Position der Kameras (2x groß) und deren Beleuchtungssystem dar (3x klein). [23]

davon in der oberen und fünf in der unteren Hemisphäre angeordnet sind. In den beiden Halbkugeln sind jeweils eine LED polar und vier äquatorial zu finden. Die obere (untere) polare LED ist zur Hauptachse ($\vartheta = 0°$) des mDOMs um 8,2° (180° − 8.2°) in ϑ - Richtung und um −22,5° in φ - Richtung ausgerichtet. Die seitlich angeordneten LEDs sind um 61° (180° − 61°) in ϑ - Richtung und um $-22{,}5° + j\,90°$ für $j = 1{,}2{,}3$ in φ - Richtung gekippt.
Abbildung 6 zeigt eine Halbkugel der Haltestruktur aus einem 3D-Modell für das mDOM. Markiert sind jeweils in gelb die Positionen der fünf LEDs und in blau der Kameras (2x groß) und deren Beleuchtungssystem (3x klein). Die LEDs liegen noch im sphärischen Teil der Haltestruktur.

Durch das Upgrade sollen noch bessere Kenntnisse über die Eiseigenschaften sowie die genaue Position der Module erzielt werden, das unter anderem zu einer besseren Rekonstruktion von kaskadenartigen Ereignissen und einer besseren Identifizierung von

Tau-Neutrinos führen würde [24]. Die optimierten Kalibrationsgeräte dienen ferner dazu, die seit Inbetriebnahme von IceCube aufgenommenen Daten erneut zu analysieren. Die Anordnung der LEDs in den mDOMs in IceCube Upgrade ermöglichen den Zugang eines größeren Winkelbereichs, insbesondere vertikal. Die Verbesserung der LEDs und die höhere Dichte der Stränge im Detektor mit IceCube Upgrade erlauben eine deutliche Verbesserung im Verständnis des umliegenden Eises und des Eises der Löcher, das nach dem Zufrieren nur noch durch die Kalibrationsgeräte kontrolliert werden kann.

3.4 Eiseigenschaften am Südpol

Um geeignete Simulationen durchzuführen und IceCube Daten auszuwerten, sind genaue Kenntnisse über die Beschaffenheiten des antarktischen Gletschereises vonnöten. Einige der unter Abschnitt 3.3 beschriebenen Kalibrationsgeräte konnten im Laufe des IceCube-Experiments und sogar mit dem Vorläufer-Detektor AMANDA wichtige Eiseigenschaften durch dezidierte Messungen liefern. Die im Rahmen dieser Arbeit behandelten LEDs dienen unter anderem, wie zuvor beschrieben, ebenfalls der Bestimmung der Eisparameter.
In höheren Lagen des antarktischen Eises sind Luftblasen im Eis eingeschlossen, welche die Ausbreitung der im Detektor entstehenden Photonen beeinflussen. Durch die Zunahme des Drucks mit steigender Tiefe werden diese allerdings komprimiert und gehen in ihre feste Phase über, so dass sie ab einer Tiefe von etwa 1500 m völlig verschwinden [25]. In einer Tiefe von 1300 m ändert sich die Ausbreitung der Photonen im Eis jedoch als Funktion der Tiefe aufgrund von vertikalen Variationen von Verunreinigungen durch Staubpartikel und Asche. Diese Variationen sind auf klimatologische Veränderungen oder katastrophale Ereignisse in der Geschichte der Erde zurückzuführen. Damit ändert sich die Beschaffenheit des Eises in der Tiefe des IceCube Detektors so wesentlich, dass eine Beschreibung unerlässlich ist.

Die wichtigsten Eigenschaften bei der Ausbreitung von Photonen durch das Eis in diesen Tiefen sind Streuung und Absorption. Lichtstreuung im Eis wird durch die Streuung der Photonen an mikroskopisch kleinen Streuzentren, wie Luftblasen oder Staubpartikel, beschrieben. Die dabei auftretende Streuung wird durch die Mie-Streuung[4] beschrieben, da die Partikeldurchmesser im Bereich der Wellenlänge der Photonen liegen. Die Streuung wird durch den Streukoeffizienten $b(\lambda)$ beschrieben. Die effektive Streulänge $(1/b(\lambda))$ bestimmt den mittleren Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Streuprozessen. Das Licht, das von den optischen Modulen detektiert wird, ist typischerweise schon mehrfach gestreutes Licht. Unter Abgabe ihrer Energie können die Photonen im Eis auch absorbiert werden. Die Beschreibung erfolgt durch den Absorptionskoeffizienten $a(\lambda)$. Die Absorptionslänge $(1/a(\lambda))$ bestimmt die durchschnittliche

[4] Nach Gustav Mie benannt, Physiker, 1868-1957.

Entfernung, die das Photon im Eis zurücklegt, bevor es absorbiert wird. Die Streu- und Absorptionslängen wurden in [25] und [11] parametrisiert und sind in Abbildung 7 für verschiedene Wellenlängen als Funktion der Tiefe dargestellt.

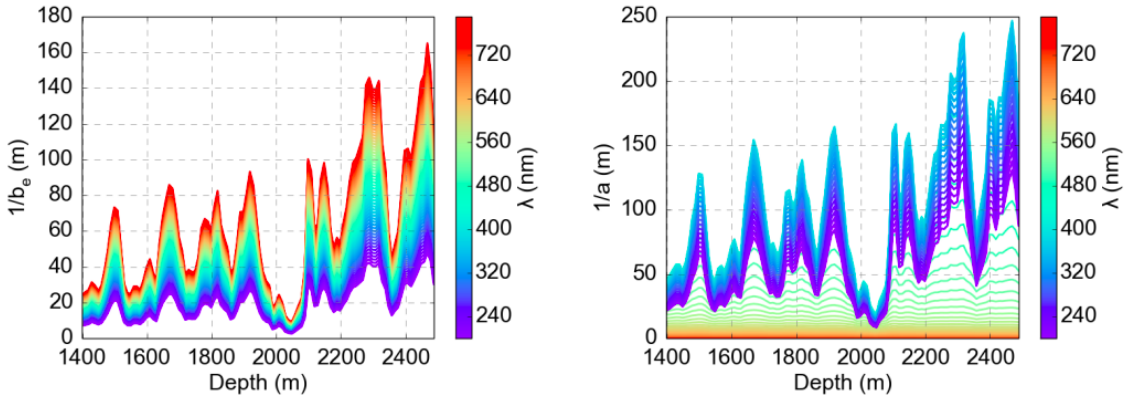


Abbildung 7: Mie-Streulänge (**links**) und Absorptionslänge (**rechts**) für verschiedene Wellenlängen als Funktion der Tiefe des antarktischen Eises. Entnommen aus [26].

Bezeichnend ist, wie stark die Eigenschaften mit der Tiefe schwanken. Beide Parameter zeigen ein ähnliches Verhalten, da beide Parameter auch von der Anzahl der Staubpartikel im Eis beeinflusst werden. Während der Streukoeffizient $b = 1/\lambda$ mit zunehmender Wellenlänge abnimmt, nimmt der Absorptionskoeffizient $a = 1/\lambda$ zu. Das bedeutet für große Wellenlängen werden die Photonen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit absorbiert.

In dieser Arbeit wird das Emissionsprofil einer LED in die Simulation eingesetzt, um zukünftig Studien durchzuführen, um daraus die beschriebenen Eisparameter zu bestimmen. Um zunächst die Kontrolle über das Emissionsprofil selbst zu haben, werden die meisten im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien in Eis ohne diese optischen Eigenschaften durchgeführt.

4 Geant4-Simulation

Gegenstand dieser Arbeit ist die Erweiterung eines bestehenden mDOM-Modells [27, 28], um die LEDs und Untersuchungen deren Emissionsprofils. Für das Vorgehen sind diverse Simulationen nötig. Diese werden mit Geant4 durchgeführt.
In diesem Kapitel wird ein Einblick in Geant4 gegeben und das verwendete Modell vorgestellt.

4.1 Geant4 Simulationssoftware

Geant4 (GEometry And Tracking) ist eine freie Software, welche auf der objektorientierten Progammiersprache C++ basiert [29]. Es ist ein Monte-Carlo basiertes Toolkit, welches ermöglicht, Teilcheninteraktionen in Materie zu simulieren. Es findet in verschiedenen Bereichen Anwendungen, wie beispielsweise in der Raumfahrttechnik, der Nuklearmedizin und der Teilchenphysik. Die Software wurde entwickelt, um alle relevanten Aspekte eines Teilchendurchgangs durch Materie zu realisieren: Die Geometrie des Aufbaus, die verwendeten Materialeigenschaften und Teilchen, die physikalischen Prozesse der Wechselwirkungen und ebenso das Extrahieren von Ergebnissen und Daten sowie die Visualisierung des Aufbaus und der Teilchentrajektorien. Die Software stellt dabei ein umfassendes Set an physikalischen Modellen bereit, welche diverse physikalische Prozesse enthalten.

4.1.1 Geometrie in Geant4

In Geant4 werden Volumen mit bestimmten phyikalischen Eigenschaften erstellt. Sobald ein Objekt erstellt wird, wird dies in der sogenannten *Welt* platziert. Das erstellte Objekt stellt das sog. *Tochtervolumen* dar. Neu erstellte Objekte müssen immer vollständig in ihrem sogenannten *Muttervolumen* liegen. Alles, was innerhalb der *Welt* geschieht, ist Teil der Simulation, verlässt ein Teilchen die *Welt*, ist es nicht mehr in der Simulation enthalten.
Ein Volumen wird in Geant4 in drei Schritten (mit Klassen in Geant4) erstellt. Zuerst wird die Geometrie des Körpers definiert, dies können beispielsweise Kugel, Zylinder, Ellipsoid etc. sein (Klasse **G4Solid**). Schnittmengen, Subtraktionen oder Additionen sind dabei ebenfalls möglich. Zweitens werden dem Körper seine Materialeigenschaften und optische Eigenschaften etc. gegeben (**G4LogicalVolume**). Und schließlich wird der Körper in sein Muttervolumen platziert, wobei er beispielsweise auch rotiert werden kann (**G4PhysicalVolume**).

4.1.2 Physikalische Prozesse

Die grundlegendste Einstellung, die der Benutzer steuern kann, ist die Auswahl der physikalischen Prozesse und Modelle, die in der Simulation verwendet werden. Die

Umsetzung der Auswahl erfolgt über das Erstellen einer sogenannten *Physics List*. Physikalische Prozesse im Aufbau folgen einer bestimmten Abfolge:

- *run* - Durchlauf der Simulation, Start mit Teilchenemission,
- *event* - Simulation eines einzelnen Primärteilchens[5],
- *track* - Momentaufnahme der Teilchen,
- *step* - Unterteilung der *tracks*, Abstand zwischen den Wechselwirkungen des Teilchens.

Die in der mDOM-Simulation verwendete *Physics List* ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Für sämtliche Simulationen im Rahmen dieser Arbeit wurden nur optische Photonen verwendet. Zusätzlich sind die dazugehörigen Klassen in Geant4 aufgelistet. Die Rayleigh-Streeung ist Teil der Liste in der Simulation, wurde jedoch für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen nicht benötigt. Die Mie-Streuung greift nur bei der Einstellung von Eis mit Streuung. Dabei überwiegt die Mie-Streuung die Rayleigh-Streuung aufgrund der Größe der Partikel im Eis [26]. Der Großteil der Simulationen wurde durchgeführt mit Eis ohne Mie-Streuung.

Tabelle 1: Beschreibung der *Physics List*, die in der mDOM-Simulation verwendet wird. Einziges in die Simulation einbezogenes Teilchen ist das Photon. Aufgelistet sind die physikalischen Prozesse und die zugehörigen Klassen in Geant4.

Teilchen	Prozess	Geant4 Klasse
Photon	Absorption	G4OpAbsorption
	Optische Prozesse an Grenzflächen	G4OpBoundaryProcess
	Mie-Streuung	G4OpMieHG
	Rayleigh-Streuung	G4OpRayleigh

4.2 mDOM-Modell

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen basieren auf einem bereits existierenden mDOM-Modell, welches in Geant4 implementiert wurde.
Das Modell des mDOM enthält den Druckbehälter, die Gelschicht, die Haltestruktur, die Reflektoren sowie das Glas und die Photokathode der PMTs. Die Ausleseelektronik sowie weitere Teile der PMTs sind innerhalb der Simulation nicht enthalten.
Der Nutzer hat einige Möglichkeiten zur Auswahl. Beispielsweise bei der Wahl des PMT-Typs, bei den Materialien für Gel und Glas, der Größe der *Welt*, der die Definition des Materials des umgebenen Mediums oder der Wellenlänge der Photonen. Das

[5] Sekundärteilchen sind Teilchen, welche in Wechselwirkungen entstehen.

Abbildung 8: mDOM-Modell in Geant4.

Modul muss zu jedem Zeitpunkt vollständig in der *Welt* platziert sein. Ferner kann der Benutzer zwischen einem mDOM-Modell mit allen 24 PMTs oder nur einem einzigen PMT wählen. Für alle Simulationen mit den LEDs wurde das volle mDOM-Modell gewählt, wie in Abbildung 8 zu sehen.

5 Luftblase

Hintergrund dieses Kapitels ist eine Übungsaufgabe im Rahmen dieser Bachelorarbeit, um einen Einstieg in Geant4 zu erhalten. Der Inhalt wird hier daher knapp gehalten. In der Gelschicht im mDOM entstehen Luftblasen, welche nicht gewünschte Streuung der Photonen verursachen können. Der Einfluss solch einer Luftblase wird im Folgenden untersucht und diskutiert.

5.1 Entstehung von Luftblasen im Gel

Das mDOM besteht aus zwei identischen Hemisphären. Zwischen der Haltestruktur und des Druckbehälters, befindet sich die Gelschicht, so dass jeder der 24 PMTs eines mDOMs durch das Gel an den Druckbehälter gekoppelt ist. Das optische Gel benötigt drei Tage, um auszuhärten und einige Schritte bei der Verarbeitung. Es besteht aus einem zweikomponentigen Silikon, welches in einem Mischverfahren vereinheitlicht wird. Vor dem Mischvorgang werden die Komponenten entgast, um so Lufteinschlüsse zu vermeiden. Dieser Prozess wird als Primärentgasung bezeichnet [30].

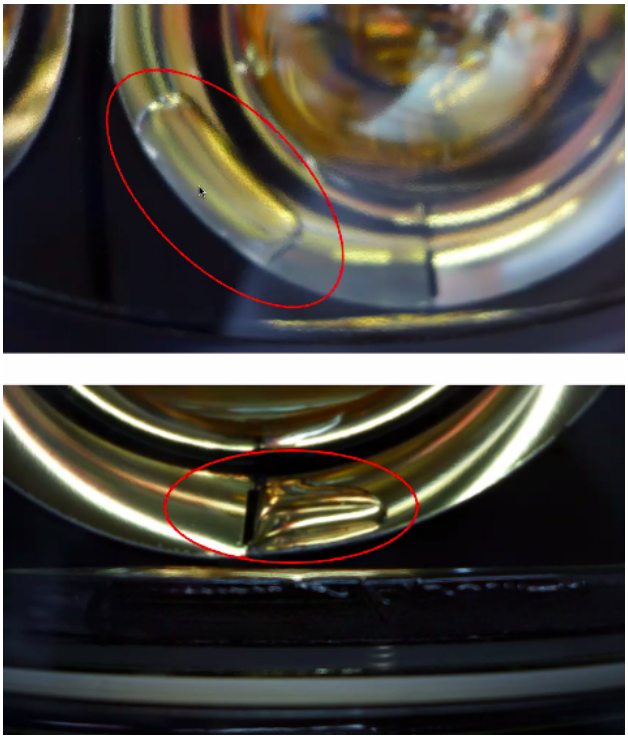


Abbildung 9: Luftblasen im Gel im Vordergrund eines Reflektors, die nach dem Abdichten der beiden Hemishpären des mDOMs entstehen können. Entnommen aus [23].

Das präparierte Gel wird in zwei Stufen unabhängig voneinander in die obere und untere Modulhälfte ausgegossen. In zwei Stufen, da das Gel zunächst bis ca. 5 cm unterhalb der Druckbehälter-Kante gefüllt und anschließend zwischen zwei und drei Stunden bis 20 mbar entgast wird und im zweiten Schritt das restliche Gel eingefüllt und hinterher für wenige Minuten bei 250 mbar entgast wird. Dieser Prozess des Entgasens nach dem Ausgießen des Gels in die Modulhältften wird als Nachentgasung bezeichnet [30]. Dieses Nachentgasen ist wichtig, um die eingeschlossenen Luftblasen zu eliminieren, die das Delaminationsrisiko bei Niedertemperatur- und Vakuumbedingungen fördern würden. Anschließend härtet das Gel bei einer Luft von 1 atm drei Tage lang aus. Hinterher werden die Modulhälften durch Unterdruck abgedichtet. Durch das entstehende Vakuum können sich eingeschlossene Luftblasen im Gel, welche durch das Entgasen nicht vollständig verhindert werden konnten, weiter ausdehnen und als An-

griffsfläche für die Streuung der Photonen dienen. Abbildung 9 zeigt die Ansicht zweier Luftblasen im Vordergrund eines Reflektors, wo sie typischerweise auftreten.
Abbildung 10 zeigt zwei Modulhälften eines mDOMs bei dem beschriebenen Ausgussverfahren im Labor. Das Gel ist dabei bis zur ersten Stufe eingefüllt und das Entgasen findet statt.

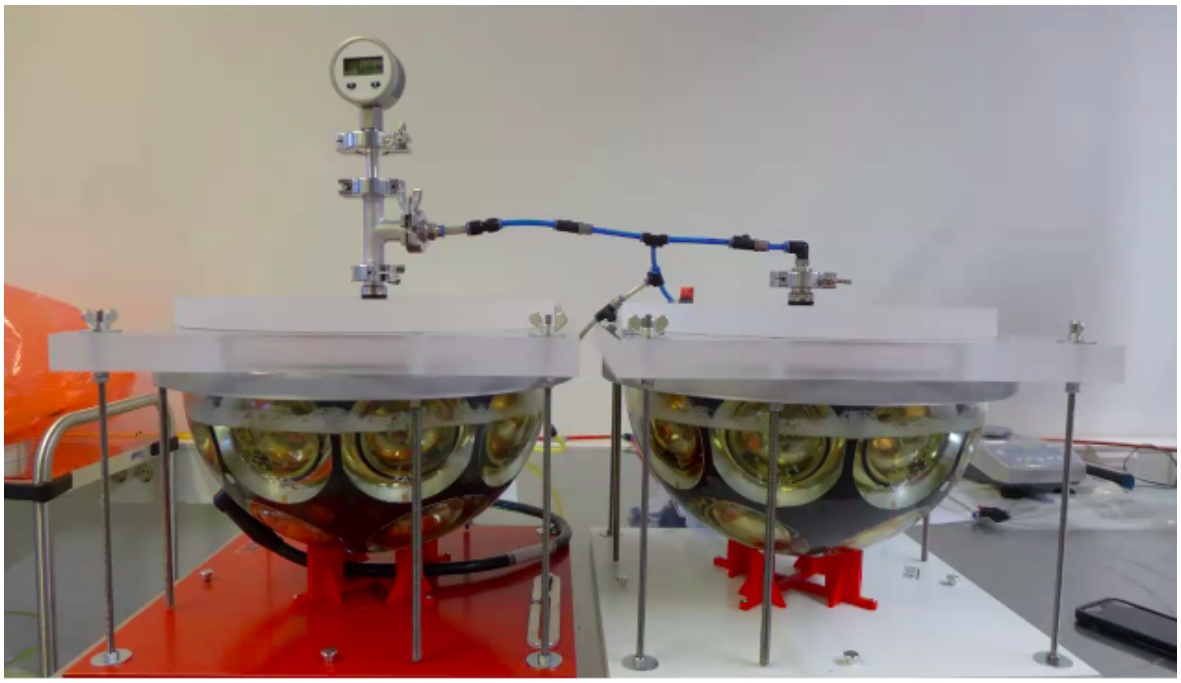


Abbildung 10: Ausgussverfahren. Das optische Gel wurde noch nicht vollständig in die obere (links) und untere (rechts) Modulhälfte des mDOMs ausgefüllt, die Entgasung findet bei 20 mbar für zwei bis drei Stunden statt. Das Entgasen ist wichtig, um Lufteinschlüsse im Gel zu vermeiden. Entnommen aus [23].

Nach dem Abdichten der beiden Modulhälften durch Herstellen eines Unterdrucks (etwa 500 mbar) sind innerhalb weniger Stunden Beobachtungen von Luftblasen auf den Reflektoren gemacht worden, wobei vorher im Gel keine sichtbaren Lufteinschlüsse zu sehen waren. Durch den Unterdruck können sich allerdings schon vorher eingeschlossene Blasen weiter ausdehnen.

5.2 Luftblasen in Geant4

Um den Einfluss der Luftblasen zu überprüfen, werden diese zunächst in Geant4 simuliert. Das Erstellen von Objekten in Geant4 ist bereits in Kapitel 4 erklärt. Unter Abschnitt 4.2 ist das mDOM-Modell in Geant4 beschrieben. Für die Simulation der Luftblasen eignet sich das mDOM-Modell mit nur einem einzigen PMT. Abbildung 11 zeigt das Modell in Geant4 mit einem PMT. Zusätzlich ist eine Luftblase im Vordergrund des Reflektors platziert. Die Luftblase sitzt dabei unmittelbar im Vordergrund des Reflektors und grenzt an das Glas des PMTs. Das Gel befindet sich demnach um die

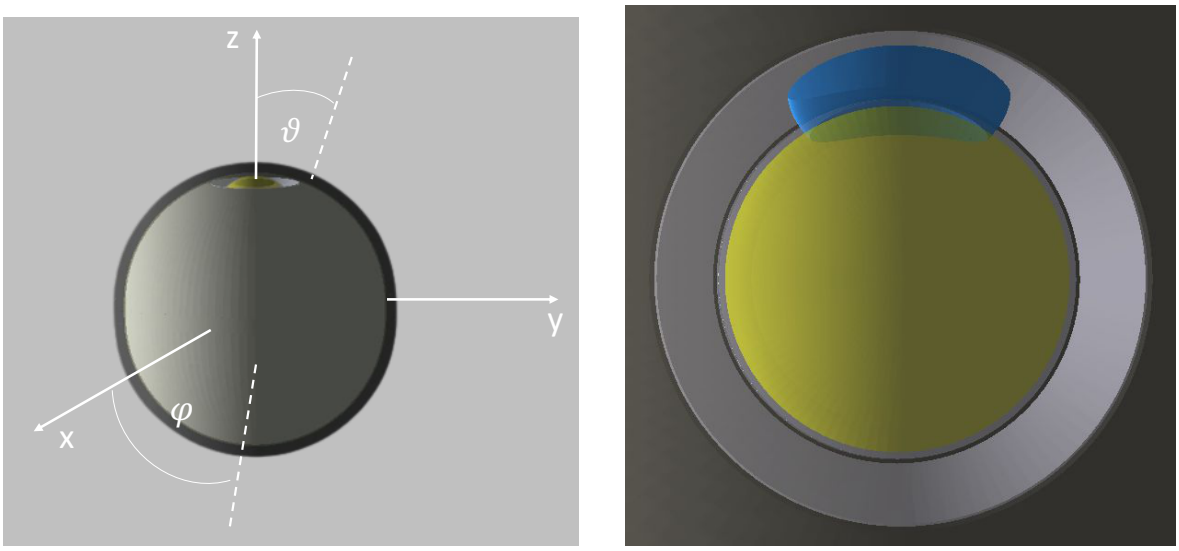


Abbildung 11: Links: mDOM-Modell in Geant4 mit nur einem einzigen PMT bei $\vartheta = 0°$ sowie eingezeichnet das Bezugssystem. **Rechts:** Ansicht des PMTs von oben mit einer simulierten Luftblase im Vordergrund des Reflektors.

Luftblase herum, jedoch nicht unter ihr, so dass sich in diesem Fall zwischen PMT-Glas und Luftblase kein Gel befindet.

Nach der in dieser Arbeit verwendeten Konvention verläuft der Winkel ϑ von $0°$ (Nordpol des Moduls) bis $180°$ (Südpol des Moduls) und φ von $0°$ bis $360°$ (vgl. Abb. 11). Der einzige PMT im mDOM-Modell ist bei $\vartheta = 0°$ platziert. Während für die Simulationen mit der LED die Abstrahlcharakteristik dieser relevant ist, interessiert bei der Luftblase das Verhalten der Photonen, die auf das Modul treffen. Für diesen Fall kann der Benutzer auf das Modul auftreffende Photonen simulieren. Dies kann auf zwei unterschiedliche Weisen geschehen: Zum einen wird eine einfallende ebene Welle simuliert und zum anderen kann ein sogenannter *Pencil Beam* simuliert werden, bei dem ein sehr dünner Teilchenstrahl paralleler Photonen erzeugt wird. Im ersten Fall werden die Photonen von einer Scheibe senkrecht zum Zentrum des Moduls emittiert und damit der Einfall einer ebenen Welle auf das mDOM simuliert. Der Durchmesser des Emissionsradius kann beliebig gewählt werden. Um den Einfluss einer Luftblase im Vordergrund eines Reflektors zu prüfen, wird die Emission für Einfallswinkel über den gesamten Raumwinkel durchgeführt. Diese Methode wird im Folgenden als „Winkel-Scan“ bezeichnet. Für den zweiten Fall wird der dünne Photonenstrahl durch die Angabe von kartesischen Koordinaten an eine beliebige Stelle platziert. Für die Simulation mit dieser Methode wird der gesamte PMT „abgerastert“, indem für beliebig kleine Schritte jeweils ein Teilchenstrahl simuliert wird. Diese Methode wird im Folgenden als „XYZ-Scan“ bezeichnet. In Abbildung 12 sind die beiden beschriebenen Fälle der Teilchenemission zu sehen. Wenn ein Photon die Photokathode des PMTs (gelb) trifft, wird dieses als Treffer gespeichert und ausgewählte Informationen über dieses Photon werden in eine Datei geschrieben. Anschließend wird das Photon aus der Simulation

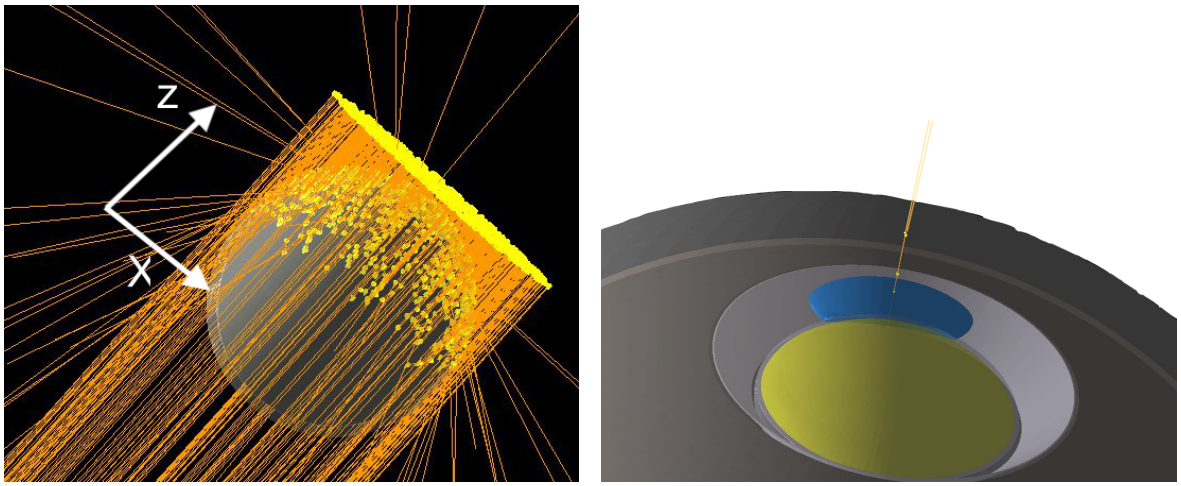


Abbildung 12: Links: Simulation von 500 eintreffenden Photonen. Die Position der Emissionsscheibe liegt bei $\vartheta = \varphi = 0°$. Die Photonen treffen genau von oben auf den einzigen PMT des Moduls, der in diesem Bild durch die Photonen verdeckt ist. Die Einfallsrichtung der simulierten ebenen Welle kann durch die Parameter ϑ und φ verändert werden. **Rechts:** *Pencil Beam*, der direkt auf die Luftblase trifft.

entfernt, um Mehrfachtreffer durch Streuung zu vermeiden. Durch die Untersuchung der Trefferanzahl für verschiedene Einfallswinkel oder Positionen des Teilchenstrahls kann der Einfluss einer simulierten Luftblase auf die Sensitivität des Moduls geprüft werden.
Die Luftblase selbst wurde beliebig groß gewählt, beliebig im Vordergrund des Reflektors platziert und das Material Luft verwendet.

5.3 Einfluss einer Luftblase

Abbildung 13 zeigt zum einen das Ergebnis eines XYZ-Scans mit und ohne Luftblase. Der Bereich des PMTs wurde in 1 mm - Schrittweite „abgerastert“. Dabei wurden 10.000 Photonen pro Schritt über dem PMT senkrecht zum Modul emittiert. Die Struktur des PMTs ebenso wie der Luftblase sind eindeutig zu identifizieren. Außerhalb des PMTs befindet sich die absorbierende Haltestruktur, weshalb dort nur eine blaue Einfärbung zu verzeichnen ist. Ebenso zwischen dem Reflektor und der Photokathode. Auf der Photokathode selbst wurden die meisten Photonen registriert. Besonders die Ränder der Luftblase hindern die Photonen beim Auftreffen. Dort werden die Photonen vermutlich am stärksten gestreut, so dass sie an anderer Stelle auftreffen und als Treffer gespeichert werden. In Abbildung 14 ist die Differenz der Scans mit und ohne Luftblase zu sehen. Dies zeigt unmittelbar den Einfluss der Luftblase. Besonders der obere Rand der Luftblase verzeichnet ein starkes Einbüßen der Photonen (blaue Einfärbung), während die Luftblase verursacht, dass der Spalt zwischen der Photokathode und dem Reflektor minimal geringer wird und daher in Abbildung 14 starke rote Einfärbungen zustande kommen. Hier ist zu erkennen, wo die meisten Photonen vermutlich gestreut werden.

Aufgrund der beliebigen Strukturen, die solche Lufteinschlüsse annehmen können, ist dies nicht kontrollierbar.

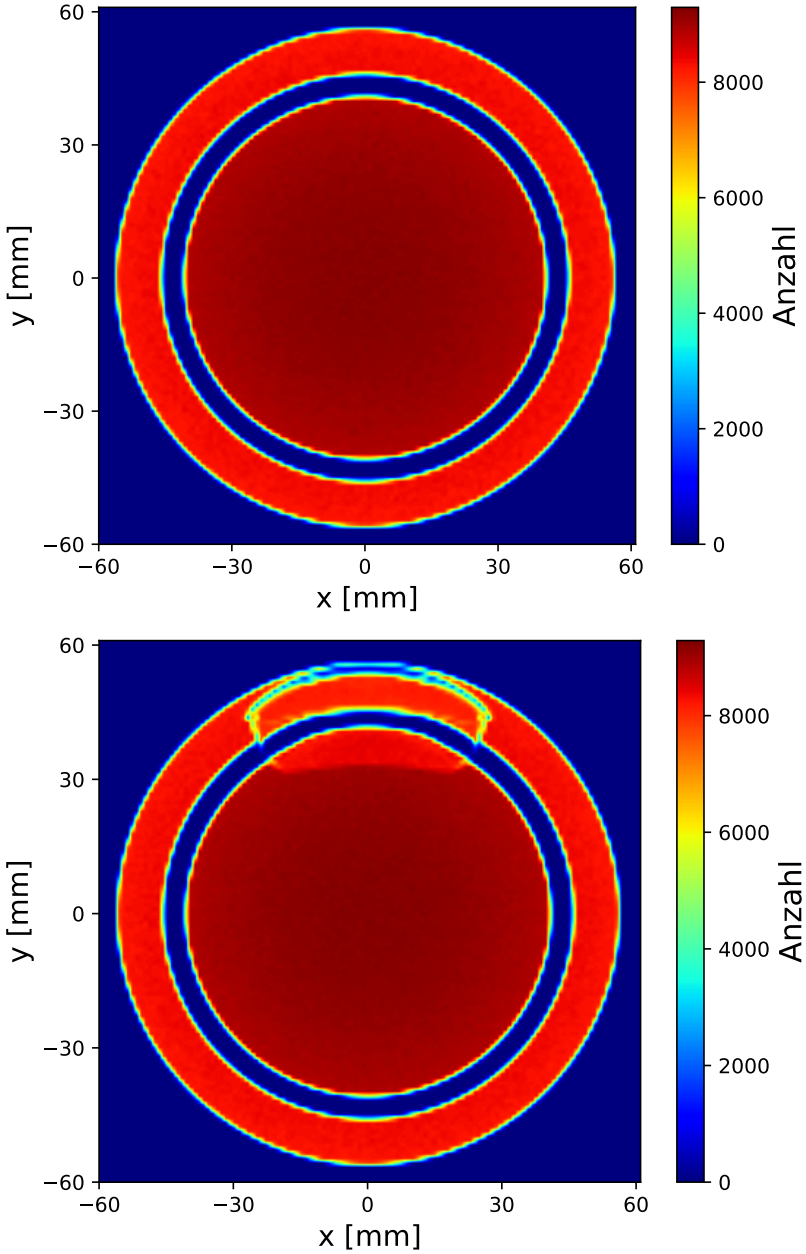


Abbildung 13: XYZ-Scan des PMTs ohne (**oben**) und mit (**unten**) Luftblase im Vordergrund des Reflektors.

Die Abbildung 15 zeigt das Ergebnis des Winkel-Scans mit und ohne Luftblase. Dabei wurden Photonen für Einfallswinkel über den gesamten Raumwinkel emittiert. Da das mDOM-Modell nur einen PMT enthält, der die Photonen detektieren kann und die restliche Fläche des Moduls die absorbierende Haltestruktur darstellt, ist die gesamte untere Hälfte (Südhalbkugel) blau eingefärbt. Für jedes Raumelement (1°-Schrittweite) wurden 1 Millionen Photonen emittiert. Die effektive Fläche A_{eff} kann aus dem Anteil der detektierten Photonen n_{det} an der Gesamtzahl der emittierten Pho-

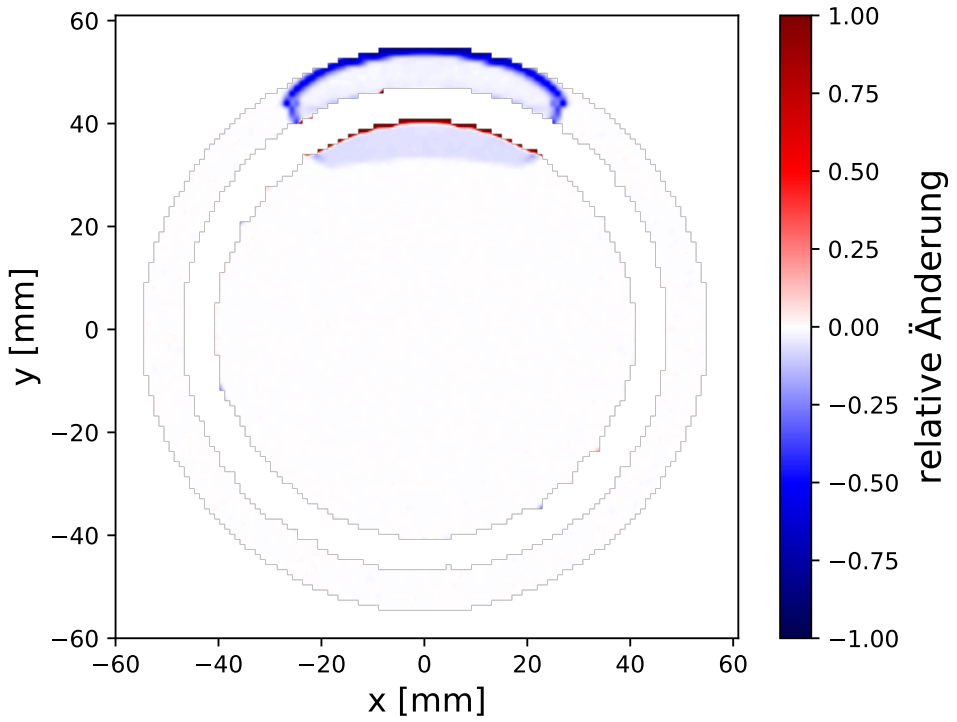


Abbildung 14: Differenz des Scans mit und ohne Luftblase. Zu sehen ist die relative Änderung. Negative Werte zeigen den Einfluss einer Abschattung der Lutblase.

tonen n_{em} sowie der Fläche der Emitterebene A_{em} abgeleitet werden[6]:

$$A_{\mathrm{eff}}(\vartheta,\varphi) = \frac{n_{\mathrm{det}}(\vartheta,\varphi)}{n_{\mathrm{em}}} \cdot A_{\mathrm{em}}. \tag{4}$$

Der Radius der Emitterebene betrug in den Simulationen 200 mm.
Die Luftblase selbst besitzt die folgenden Koordinaten:

$$\begin{aligned} x &= (0 \pm 26)\,\mathrm{mm}, \\ y &= (42 \pm 10)\,\mathrm{mm}, \\ z &= (155 \pm 10)\,\mathrm{mm}. \end{aligned} \tag{5}$$

Damit besitzt sie in etwa die folgende Winkelausdehnung:

$$\begin{aligned} 10^\circ \leq \vartheta \leq 20^\circ, \\ 60^\circ \leq \varphi \leq 120^\circ. \end{aligned} \tag{6}$$

Zwischen den beiden Plots in Abbildung 15 ist qualitativ kein Unterschied zu erkennen. Das bedeutet, der Einfluss der Luftblase ist hier nicht zu erkennen. In Abbildung 16

[6] Die statistische Unsicherheit einer Monte-Carlo-Simulation bei n detektierten Teilchen beträgt $\sqrt{n}$.

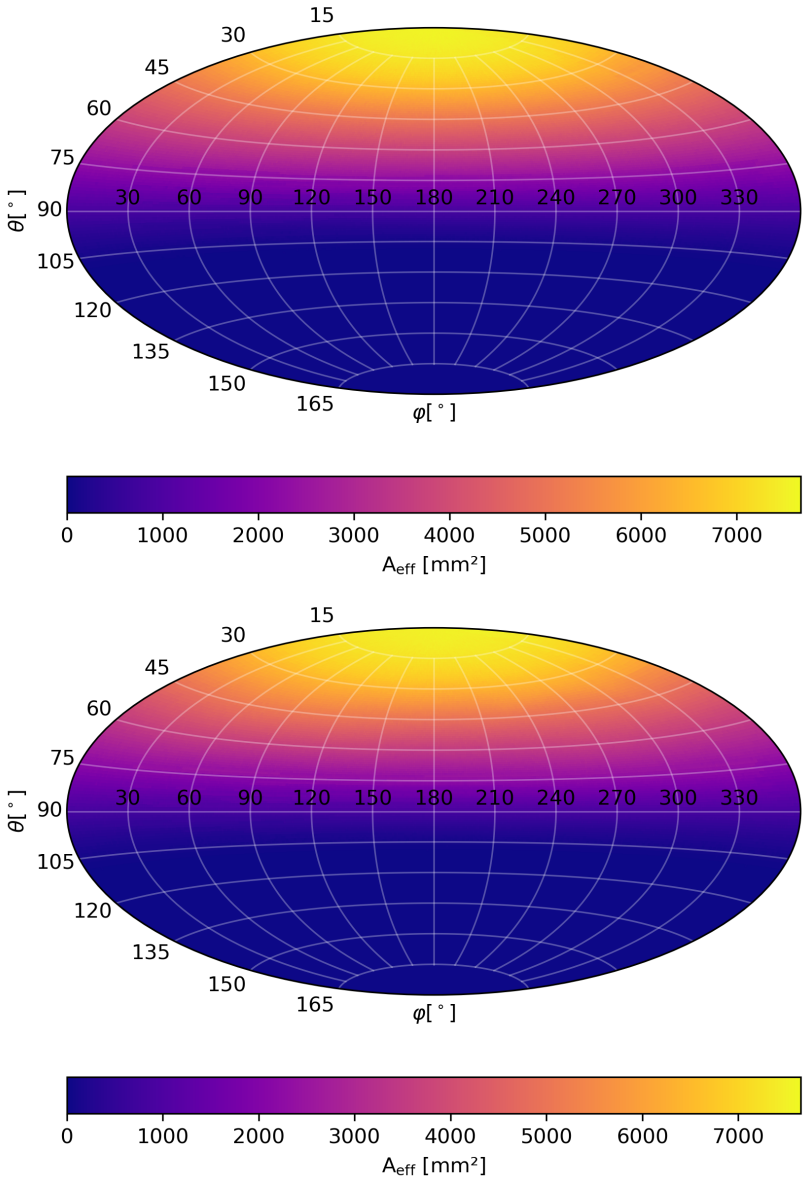


Abbildung 15: Winkel-Scan des PMTs ohne (**oben**) und mit (**unten**) Luftblase im Vordergrund des Reflektors. Abgebildet ist die effektive Fläche des Moduls. Qualitativ lässt sich kein Unterschied erkennen.

ist wieder die Differenz der Winkel-Scans mit und ohne Luftblase zu sehen. Dunkle Einfärbungen zeigen ein Defizit an Photonen, so dass an diesen Stellen aufgrund der Luftblase weniger Photonen detektiert wurden als ohne der Luftblase. Die streifenartigen Einfärbungen im Bereich des Äquators sowie des gelben Meridians bei $\varphi \approx 345\,^\circ$ rühren vermutlich von Simulationsartefakten. Hier könnte eine höhere Statistik mehr Aufschluss geben. Dunkle Einfärbungen, und damit ein Verlust an Photonen, sind insbesondere rund um $\varphi = 270\,^\circ$ und $\vartheta = 45\,^\circ$ zu verzeichnen. Diese können auf die Luftblase zurückgeführt werden. Durch den Winkel-Scan werden Emitterebenen simuliert. Da die Luftblase selbst bei $\varphi_L = (90 \pm 30)\,^\circ$ liegt, zeigt eine in positive ϑ-Richtung

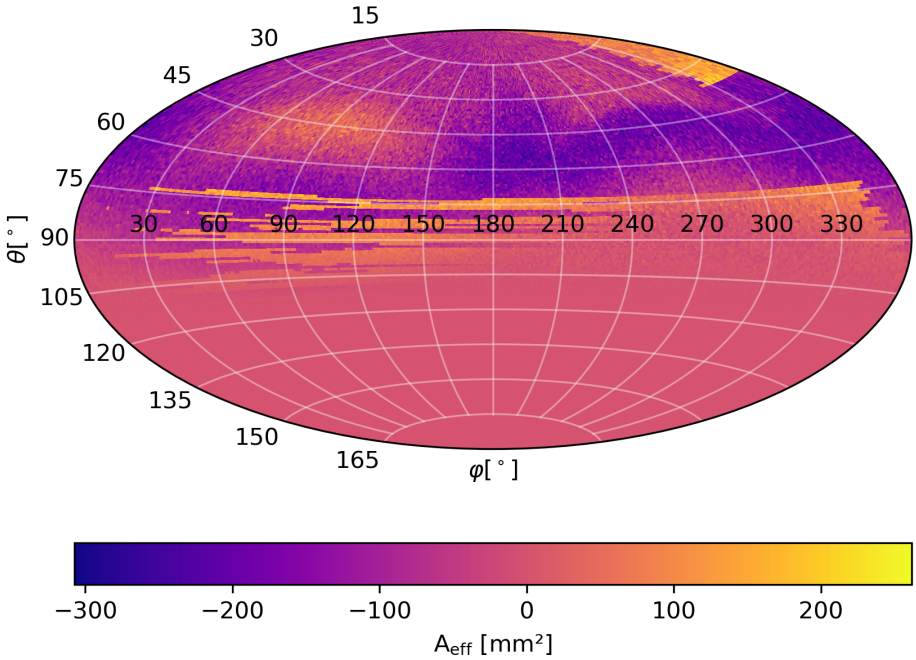


Abbildung 16: Änderung der effektiven Fläche.

gekippte Ebene genau für $\varphi_L + 180°$ genau auf die Luftblase.
Die über alle Winkel gemittelte effektive Fläche des mDOMs wird durch eine Integration über den gesamten Raumwinkel erhalten gemäß

$$\bar{A}_{\text{eff}} = \frac{1}{N} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} A_{\text{eff}}(\vartheta, \varphi) \sin\vartheta \, \mathrm{d}\vartheta \, \mathrm{d}\varphi, \tag{7}$$

wobei N der Normierungsfaktor ist:

$$N = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin\vartheta \, \mathrm{d}\vartheta \, \mathrm{d}\varphi = 4\pi. \tag{8}$$

Mit den Gleichungen 7 und 8 kann die gemittelte effektive Fläche des mDOMs mit $A_{\text{eff,m}}$ und ohne $A_{\text{eff,o}}$ Luftblase berechnet werden. Erwartungsgemäß müsste $A_{\text{eff,m}} < A_{\text{eff,o}}$ gelten, da die Luftblase die effektive Fläche verringert. Die folgenden Ergebnisse bestätigen dies:

$$\bar{A}_{\text{eff,m}} = (1904{,}29 \pm 0{,}30)\,\text{mm}^2 \quad \bar{A}_{\text{eff,o}} = (1939{,}63 \pm 0{,}29)\,\text{mm}^2 \tag{9}$$

Das Maß für den Verlust an Photonen liefert die Größe L wie folgt:

$$L = \frac{\bar{A}_{\text{eff,o}} - \bar{A}_{\text{eff,m}}}{\bar{A}_{\text{eff,o}}} = (1{,}82 \pm 0{,}02)\ \%. \tag{10}$$

Der Unterschied zwischen der über den gesamten Raumwinkel gemittelten effektiven Fläche mit $\bar{A}_{\mathrm{eff,m}}$ und ohne $\bar{A}_{\mathrm{eff,o}}$ Luftblase ist nur sehr gering (vgl. Gl. 9). Das zeigt auch die Größe L in Gleichung 10, die als Maß für den Verlust der Photonen angesehen werden kann. Der Einfluss der Luftblase ist demnach gering, jedoch fehlen hier adäquate Vergleichswerte. Die effektive Fläche des einzigen PMTs wird um $L = (1{,}82 \pm 0{,}02)$ % reduziert. In Abbildung 16 ist der Einfluss der Luftblase offenbar durch eine dunkle Einfärbung zu sehen, jedoch um $\varphi = 180°$ gedreht eine gelbe Punktewolke zu sehen, die angibt, dass hier mehr Photonen registriert wurden. Diese könnte ähnlich wie in Abbildung 14 durch Streuung zustande kommen, so dass dort mehr Photonen detektiert werden, aber um $\varphi = 180°$ gedreht weniger und insgesamt kaum ein Verlust an Photonen zu verzeichnen ist. Insbesondere Abbildung 14 zeigt, dass lokal sehr viele Photonen verloren werden.

6 Implementation der LEDs in Geant4

In diesem Kapitel wird das Vorgehen der Implementation der LEDs in die Geant4 Simulation behandelt.

6.1 Erweiterung des mDOM-Modells

Das bestehende mDOM-Modell wird im Rahmen dieser Arbeit um die LEDs erweitert. Dabei ist die Simulation der LEDs in Geant4 unterteilt in die Simulation des LED-Körpers und der Abstrahlcharakteristik der LED. Der LED-Körper bildet ein zu erstellendes Objekt in Geant4, während das Emissionsprofil eine Teilchenquelle darstellt. Für das Emissionsprofil der LED liegen experimentelle Daten vor. Ziel ist es, diese Daten in die Geant4-Simulation zu implementieren.

6.1.1 LED-Körper

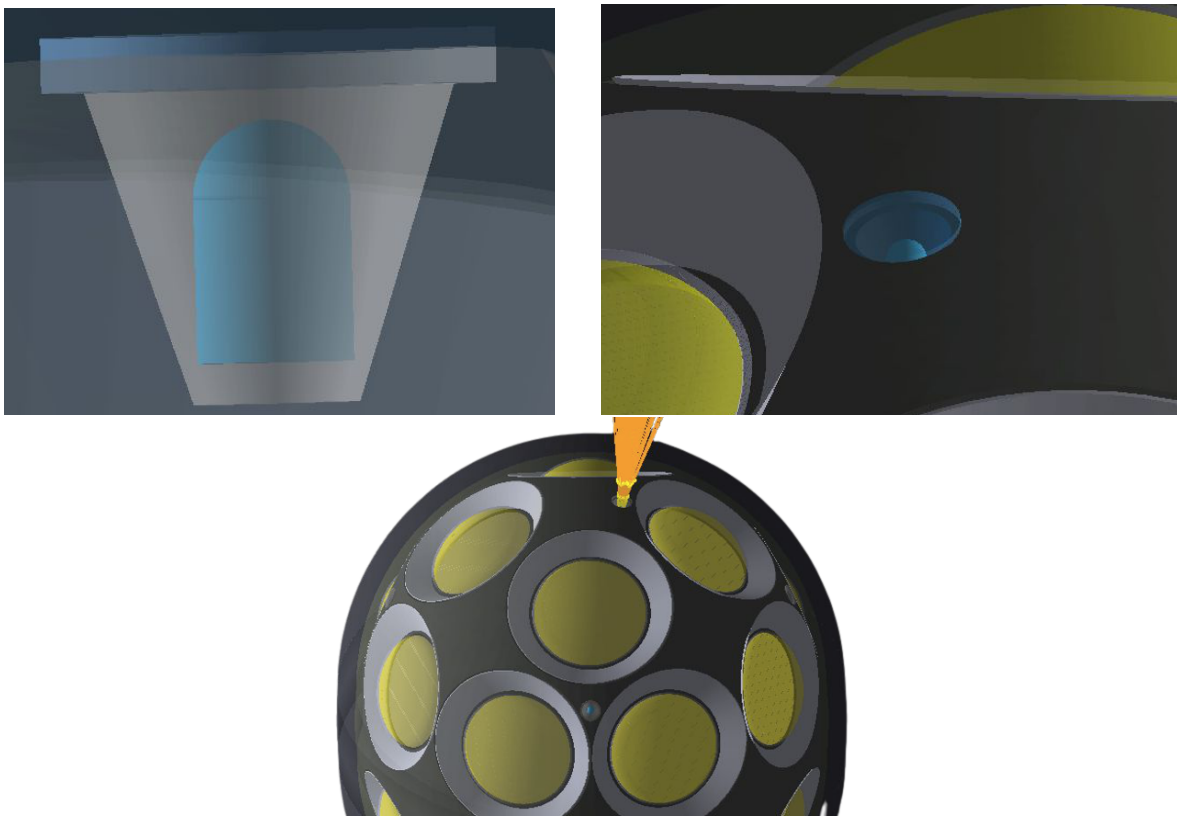


Abbildung 17: LED im mDOM-Modell. **Oben:** Die LED sitzt innerhalb der Simulation in einem kegelförmigen Loch, darüber liegt ein Glasfenster. **Unten:** Die polare LED strahlt das Emissionsprofil ab.

Das Erstellen der LEDs in Geant4 geschieht angepasst an die realen Begebenheiten. So werden zehn LEDs vom Typ XRL-400-5O simuliert, die Positionen entsprechen denen

in Abschnitt 3.3 beschriebenen. Für die LEDs wird ein neues Material in Geant4 mit der Komponente G4_SILICON_DIOXIDE erstellt (aus der NIST Material Database [31]). Der Brechungsindex wird ebenfalls in Geant4 eingestellt. Dieser ist bei dem Hersteller nicht angegeben und ergibt sich als Mittelwert aus drei Werten für typische Brechungsindizes von LEDs zu $n_{\mathrm{LED}} = 1{,}536$ [32]. Für das Glasfenster über der LED wird dasselbe Glas wie für den Druckbehälter gewählt: Vitrovex. Das Gel besitzt in den Simulationen die Standardeinstellung: Shin-Etsu. Die Haltestruktur bildet in Geant4 ein Absorbermaterial und absorbiert Teilchen zu 100%. Für die Umgebung des Moduls wird Eis oder Luft gewählt.

Für die Implementation der LEDs werden Daten aus einem vorhandenen CAD-Modell (3D-Modell) herangezogen [23]. Dieses Modell liefert die Geometrie des mDOMs für die Simulationen. Die folgenden Beschreibungen stützen sich auf die Größen aus dem Modell.

Innerhalb der Haltestruktur werden kegelförmige Löcher simuliert, welche mit Luft (G4Air) gefüllt werden. In diese werden die LEDs platziert. In Geant4 „verdrängt“ die LED in dem Fall die Luft, wenn sie das Tochtervolumen des Lochs ist. Die darüberliegenden Glasfenster werden als dünne Zylinder realisiert und über den Löcher so platziert, dass sie diese schließen und gleichermaßen in die Löcher hinein- und über die Ebene der Haltestruktur herausragen. Die Haltestruktur wird von der Gelschicht umgeben, so dass auch die Glasfenster von der Oberseite her von Gel umgeben sind. Die Implementation der LEDs im Modul ist in Abbildung 17 zu erkennen: Zum einen sitzt die LED im beschriebenen Loch (hier weiß), das Glasfenster ist in blau simuliert, wobei gerade das Herausragen über die Haltestruktur (hellgrau) und das Hineinragen in die Gelschicht (dunkelgrau) gut zu erkennen ist. Die weiteren Bildern zeigen zum einen eine schräge Draufsicht auf das Modul, wobei die LED durch das blau transparent simulierte Glasfenster teilweise zu sehen ist, und zum anderen die obere

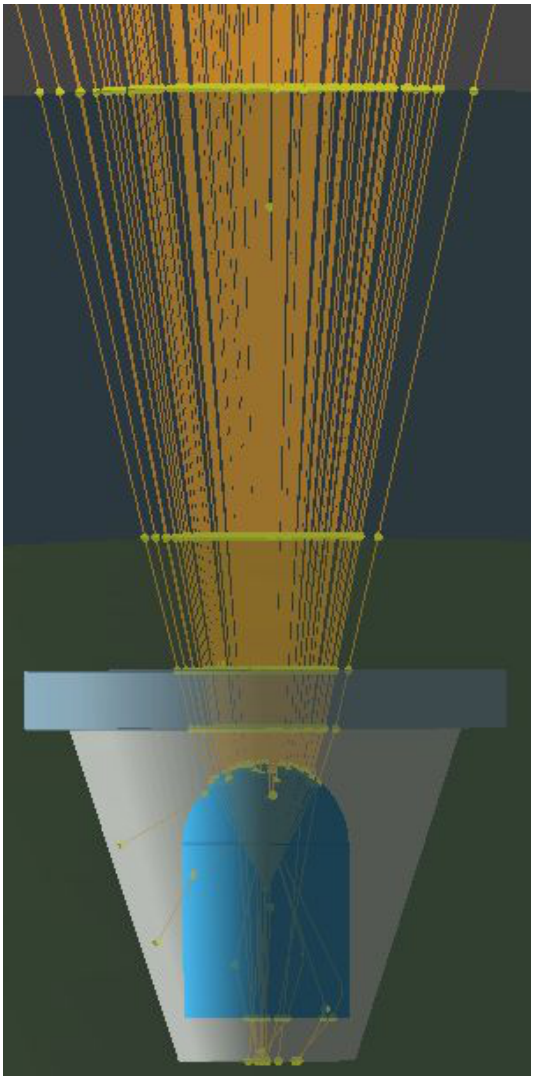


Abbildung 18: LED im mDOM-Modell mit zusätzlicher Emission von Photonen. Die gelben Punkte kennzeichnen Wechselwirkungspunkte, wie Brechung an den einzelnen Grenzflächen, Reflexion oder Absorption. Hier: mDOM Umgebung Eis, Luft (im weißen Kegel) zwischen LED und Glasfenster.

Hemisphäre des mDOMs mit der polaren und drei von den vier äquatorialen LEDs, wobei die polare Photonen emittiert. Abbildung 18 zeigt neben der in der Haltestruktur eingelassenen LED zusätzlich die Emission der Photonen. Die Photonen werden im Mittelpunkt der LED als Punktquelle emittiert. Die gelben Punkte stellen Wechselwirkungen dar. Dies können beispielsweise Reflexion, Absorption oder Brechung sein. Insbesondere Reflexion ist im LED-Körper zu sehen. Absorption ist besonders an der Grenzfläche Loch-Haltestruktur zu sehen, da die Haltestruktur Teilchen vollständig absorbiert. Es ist daher ausgeschlossen, dass Photonen in das mDOM hinein gelangen. Brechung findet an allen Grenzflächen statt: Am Übergang LED-Vakuum, Vakuum-Glaseintritt, Glaseintritt-Glasaustritt, Glasuaustritt-Gel, Gel-Glas und schließlich der Übergang vom Glas, welches das mDOM umgibt, zur *Welt*, welche in Abbildung 18 Eis als Material umfasst. Da die Brechungswinkel klein sind, ist die Brechung an den einzelnen Übergängen nicht sehr deutlich zu sehen, wenngleich sie beim näheren Betrachten zu erkennen ist. Die Behandlung der Brechung an den einzelnen Komponenten des mDOMs wird in Abschnitt 6.3 näher erläutert.

6.1.2 Emissionsprofil - vom Experiment zur Simulation

Das Emissionsprofil wird unabhängig vom LED-Körper simuliert, da dieses in Geant4 eine Teilchenquelle darstellt und kein zu erstellendes Objekt. Das Profil wird Geant4 als eine Datei mit Wertepaaren von Winkeln und zugehörigen Intensitäten als Histogramm übergeben.
Im Folgenden wird erläutert, wie das Profil aus dem Experiment extrahiert und diese Daten für die Simulation verarbeitet wurden.

Das Experiment

Für die zukünftigen LEDs in den mDOMs wurde die Abstrahlcharakteristik im Labor gemessen. Das Experiment stellt keinen Teil der Arbeit dar, die Informationen und die Daten wurden zur Verfügung gestellt [23]. Im Folgenden wird der Aufbau jedoch erläutert. Dort wurde eine einzelne LED vom Typ XRL-400-5O[7] in einem Abstand von 96 cm zu einer Photodiode vom Typ Hamamatsu S2281-01[8]. platziert. Die Photodiode ist so angebracht, dass sich der Mittelpunkt dieser genau im Zenit der LED befindet. Ferner lässt sich die Photodiode so um die LED drehen, dass der Radius von 96 cm stets beibehalten wird. So konnte bei fester Richtung der LED für verschiedene Winkel die Lichtintensität der LED mit der Photodiode gemessen werden. Der Aufbau des

[7] Die Datenblätter sind im Web zu finden unter:
`https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s2281_series_kspd1044e.pdf`.

[8] `http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_div/xrl-400-5o.pdf`.

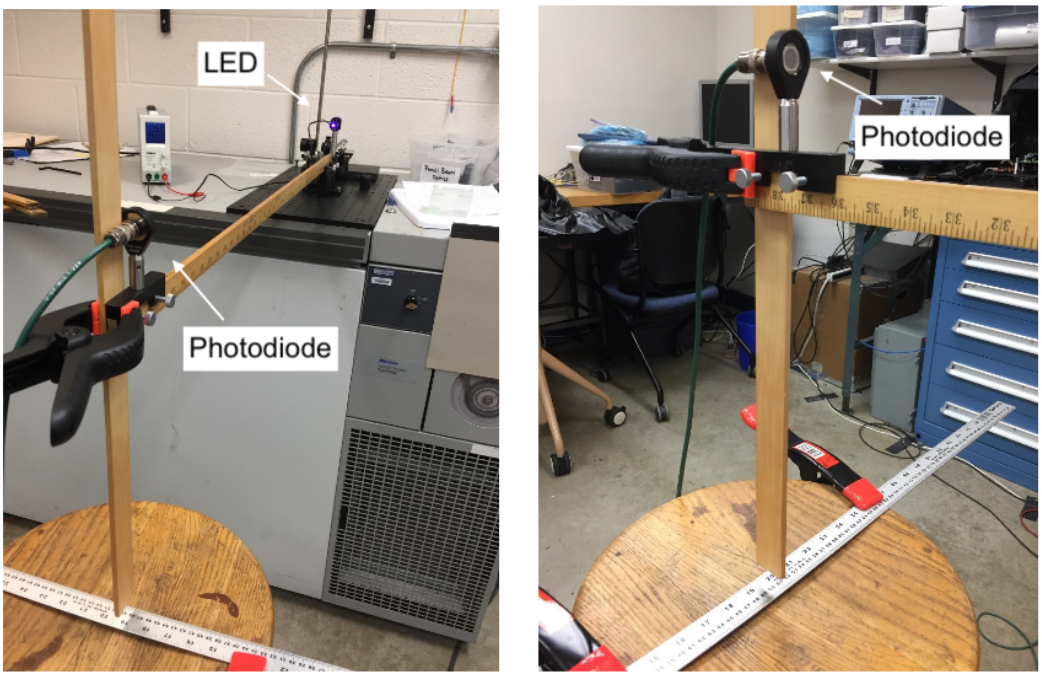


Abbildung 19: Aufbau des Experiments, aus dem die Daten für das Emissionsprofil extrahiert werden. **Links:** Blick von der Photodiode aus auf die LED. Photodiode und LED sind über einen Stab fest miteinander verbunden, die Photodiode kann im festen Abstand um die LED rotiert werden. **Rechts:** Blick auf die Photodidode, welche das Licht der LED misst. Entnommen aus [23]

Experiments ist in Abbildung 19 zu sehen.

Für diese Arbeit liegen die Daten aus dem Experiment als Tabelle mit Intensitäts- und Winkelpaaren vor. Die Messung wurde unter gleichen Bedingungen mit drei verschiedenen LEDs, jedoch alle vom selben Typ, wiederholt, wobei die Photodiode jeweils um dieselben Winkel in positive wie negative ϑ - Richtung gedreht wurde ($\vartheta \in [-21\,°;21\,°]$). Abbildung 20 sind unter anderem die drei Einzelmessungen zu entnehmen (oben). Abgebildet ist die relative Intensität über dem Winkel ϑ. Um $\vartheta = 0\,°$ herum ist in allen drei Messungen ein lokales Minimum zu verzeichnen. Ebenso ist eine leichte Asymmetrie zwischen positiven und negativen Winkeln sowie die Unterschiede zwischen den Einzelmessungen zu sehen.

Um das gemessene Emissionsprofil der LED in die Simulation zu integrieren, wurden die Daten aus den Einzelmessungen (s. Abb. 20 oben) in sechs Bereiche eingeteilt - jeweils der positive und negative Bereich - und daraus der Mittelwert gebildet. Daraus folgt das gemittelte Profil in Abbildung 20 (unten). Dieses Profil wurde im weiteren Verlauf verwendet.

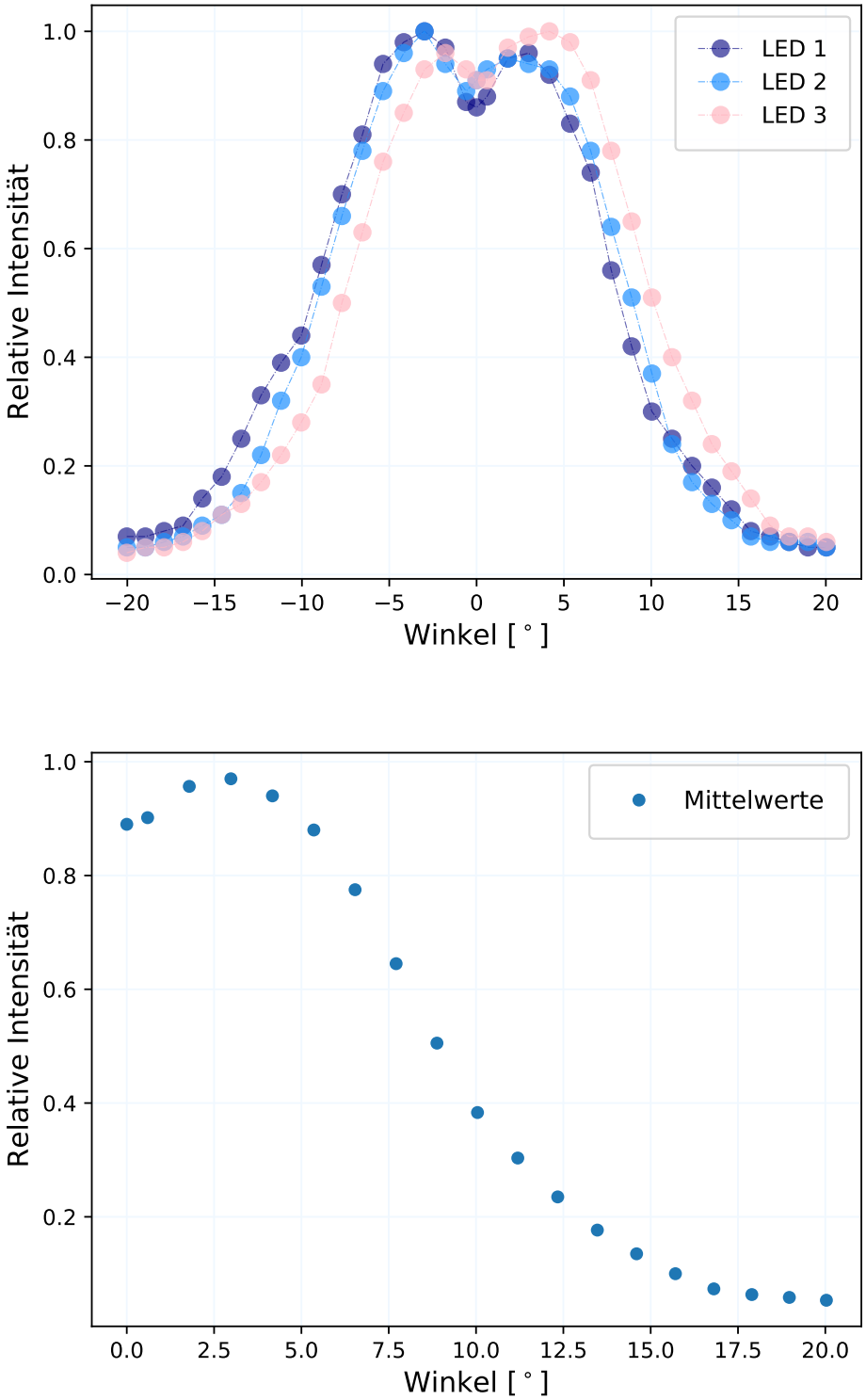


Abbildung 20: Oben: Abbildung der Messdaten für drei unterschiedliche LEDs gleichen Typs. **Unten:** Gemitteltes Emissionsprofil aus den drei Einzelmessungen. Diese gemittelten Daten wurden für das Einsetzen des Profils in die Simulation verwendet

Transformation der Winkel

Für die Simulationen werden Photonen (Geant4: *Optical Photons* von der Klasse G4OpticalPhoton) mit einer Wellenlänge von $\lambda = 405\,\text{nm}$ für die Abstrahlung verwendet.
Da die Photonen die Grenzfläche des LED-Körpers unter Brechung passieren, ist eine Transformation der Winkel vorzunehmen, um außerhalb der LED dasselbe Profil wie das im Experiment gemessene zu erhalten. Die gemessenen ϑ-Werte aus dem Experiment betreffen jene Winkel, welche außerhalb der LED gemessen wurden und werden daher im Folgenden ϑ_{det}, für „detektiert“, genannt. Winkel, die sich auf vor der Brechung, und damit innerhalb der LED, beziehen, werden im Folgenden ϑ_{em}, für „emittiert“, genannt. Gesucht ist der Zusammenhang zwischen ϑ_{det} und ϑ_{em}.

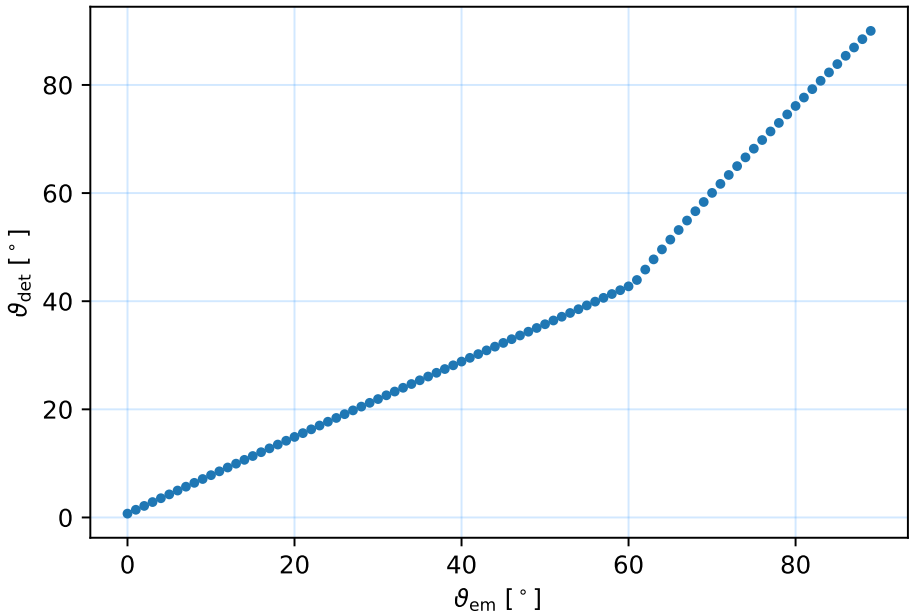


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen ϑ_{det} zu ϑ_{det}. Daraus resultiert die Anpassung der Winkel an die Brechung der Photonen am LED-Körper. ϑ_{det} sind jene Winkel, bei denen die Photonen außerhalb der LED detektiert werden und ϑ_{em} sind jene, bei denen die Photonen innerhalb der LED emittiert werden. Aufgrund der Brechung der Photonen zu kleineren Winkeln, ist ϑ_{det} kleiner als ϑ_{em}. Der Knick rührt von der Geometrie der LED und entsteht beim Übergang des sphärischen Teils des LED-Körpers in den zylindrischen.

Für die Umrechnung von ϑ_{det} zu ϑ_{em} wird in Geant4 für $\vartheta_{\text{em}} = 0°$ bis $\vartheta_{\text{em}} = 90°$ in $1°$-Schritten jeweils ein einzelnes Photon im Innern des LED-Körpers emittiert und in einem Abstand von 96 cm, Distanz wie im Experiment, detektiert. Da die experimentellen Daten $21°$ nicht überschreiten, ist es im Grunde nicht notwendig, die einzelnen Photonen bis $90°$ zu emittieren. Für die Detektion der einzelnen Photonen wird in

Geant4 eine Kugel um die LED herum simuliert, welche die Punktquelle als Mittelpunkt besitzt. Die Kugel besitzt einen Radius von 96 cm und wird in die *Welt* platziert. Ihr wird Luft als Material zugeschrieben (G4_AIR aus der Material Database). Der LED-Körper besitzt als *Muttervolumen* die Kugel. Sobald die emittierten Photonen die Kugeloberfläche durchstoßen, werden ihre kartesischen Koordinaten in eine Datei geschrieben und sie werden „zerstört“, so dass sie keinen weiteren Bestandteil der Simulation darstellen. Diese kartesischen Koordinaten werden zu sphärischen Koordinaten umgerechnet, woraus ϑ_{det} erhalten wird. Mit dieser Methode kann eine einfache Umrechnung von ϑ_{em} zu ϑ_{det} vorgenommen werden, indem ϑ_{em} und ϑ_{det} eins zu eins miteinander verglichen werden. Abbildung 21 zeigt den Zusammenhang zwischen ϑ_{det} und ϑ_{em}. Durch den Durchgang der Photonen vom optisch dichteren Medium der LED ($n_{\text{LED}} = 1{,}536$) zum optisch dünneren Medium Luft ($n_{\text{Luft}} = 1{,}0003$) werden die emittierten Photonen zu kleineren Winkeln gebrochen, das bedeutet, ϑ_{em} ist größer als ϑ_{det}. Abbildung 21 bestätigt dieses Verhalten. Der Knick rührt von der Geometrie der LED her und tritt genau da auf, wo der sphärische Teil der LED in den zylindrischen Teil übergeht.

Gewichtung des Profils

Das transformierte Emissionsprofil ist bisher nur auf eine konstante φ - Ebene angepasst. Unter Annahme einer Rotationssymmetrie der Abstrahlcharakteristik der LED, sollen die Photonen jedoch in alle φ - Richtungen emittiert werden. Die Intensität entspricht der Anzahl der Photonen pro Fläche. Aufgrund der Kugelgeometrie muss das Profil daher gewichtet werden.
Für die Gewichtung werden die Winkel mit $\sin(\vartheta)$ multipliziert, um so die Anpassung an die Kugelgeometrie zu erhalten. Abbildung 22 zeigt zum einen das transformierte und gewichtete Profil, welches der Simulation übergeben werden muss (Profil intern, orange) und zum anderen das Profil, welches außerhalb der LED gemessen wurde (Profil extern, blau), wobei hier eine Interpolation der Messdaten vorgenommen wurde. Zum einen ist die Verschiebung der Winkel aufgrund der Brechung zu erkennen: Das interne Profil besitzt Intensitätswerte für größere Winkel. Zum anderen ist die Gewichtung zu erkennen: Das interne Profil muss für kleine Winkel stark gewichtet werden, da für kleine Winkel die Kugeloberflächen in einem bestimmten Winkelbereich viel kleiner als für große Winkel sind. 1000 Punkte verteilt auf die Kugeloberläche zwischen beispielsweise 1° und 2° ergeben eine weitaus höhere Dichte der Punktewolke als dieselbe Anzahl der Punkte verteilt auf die Kugeloberläche zwischen beispielsweise 20° und 21°. Eine starke Gewichtung wird erkennbar durch eine starke Reduzierung der Intensität.
Das transformierte und gewichtete Profil liegt als Datei vor und besitzt Winkel - Intensitätspaare. Die Schrittanzahl kann beliebig klein durch eine Interpolation der Daten vorgenommen werden.

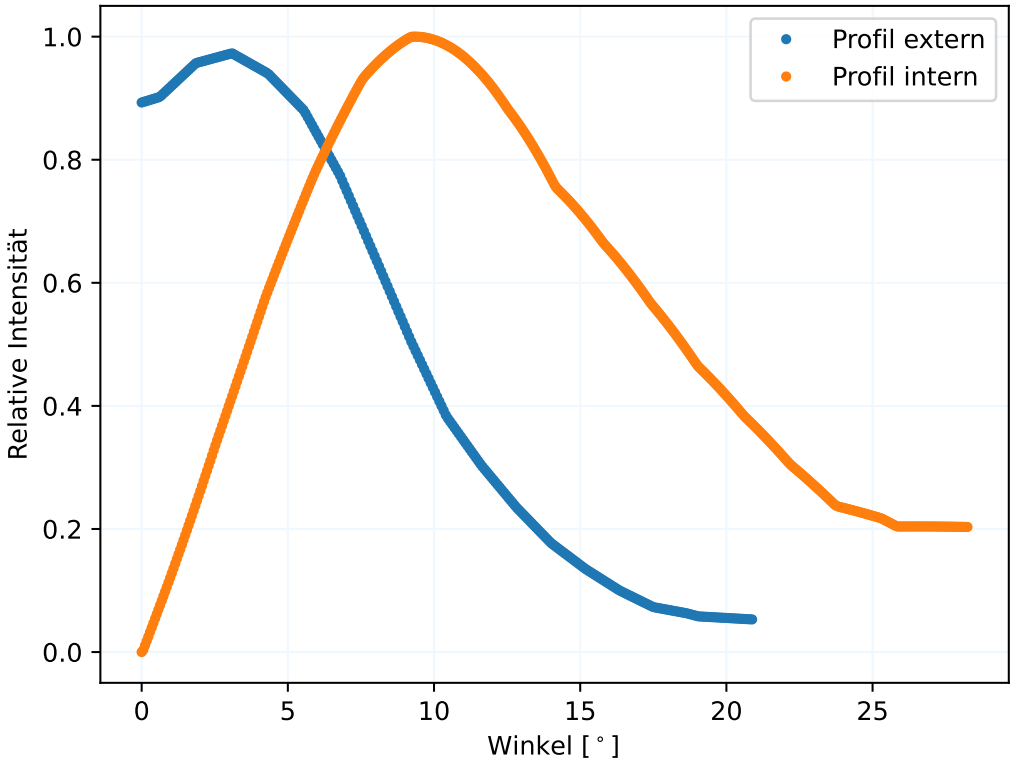


Abbildung 22: Vergleich der Emissionsprofile innerhalb und außerhalb der LED. Das interne Profil (orange) muss der Simulation übergeben werden, wenn in alle φ-Richtungen emittiert wird. Das externe Profil (blau) ist das außerhalb der LED gemessene Emissionsprofil. Die Messdaten wurden in dieser Darstellung interpoliert.

Überprüfung des Profils

Zur Überprüfung des transformierten und gewichteten Profils wird dieses in die Simulation eingesetzt und für φ im Intervall von 0 bis 2π emittiert. Die Emission der Photonen wird im Mittelpunkt der LED als Punktquelle realisiert. Das Profil beinhaltet die Abstrahlcharakteristik unter Berücksichtigung der Brechung am LED-Körper und der Abstrahlung für φ im Intervall von 0 bis 2π.

Für die Überprüfung wird eine Detektorscheibe in Geant4 simuliert. Sie besitzt dieselbe Größe wie die Photodiode im Experiment und wird in einem Abstand von 96 cm zur LED in die *Welt* platziert. Die Welt besitzt Luft als Medium. Die im Mittelpunkt der LED emittierten Photonen werden von der Detektorscheibe registriert. Jedes Photon, das auf der Detektorscheibe auftrifft, wird als Treffer gezählt und anschließend „zerstört“. Die Anzahl der Treffer wird in eine Datei geschrieben. Die simulierte De-

tektorscheibe wird schrittweise durch das Profil entlang einer konstanten φ-Ebene bewegt, wobei bei jedem Schritt 5 Millionen Photonen emittiert und von der Detektorscheibe detektiert werden. Aus der Simulation ergibt sich eine Datei mit Wertepaaren von der Anzahl der detektierten Photonen und den zugehörigen Winkeln, bei denen die Detektorscheibe stand. Zur Verdeutlichung werden die Treffer der detektierten Photonen gegen die zugehörigen Winkel der Detektorscheibe aufgetragen. Das Ergebnis der Überprüfung ist der Abbildung 23 zu entnehmen. Abbildung 23 zeigt zum Vergleich

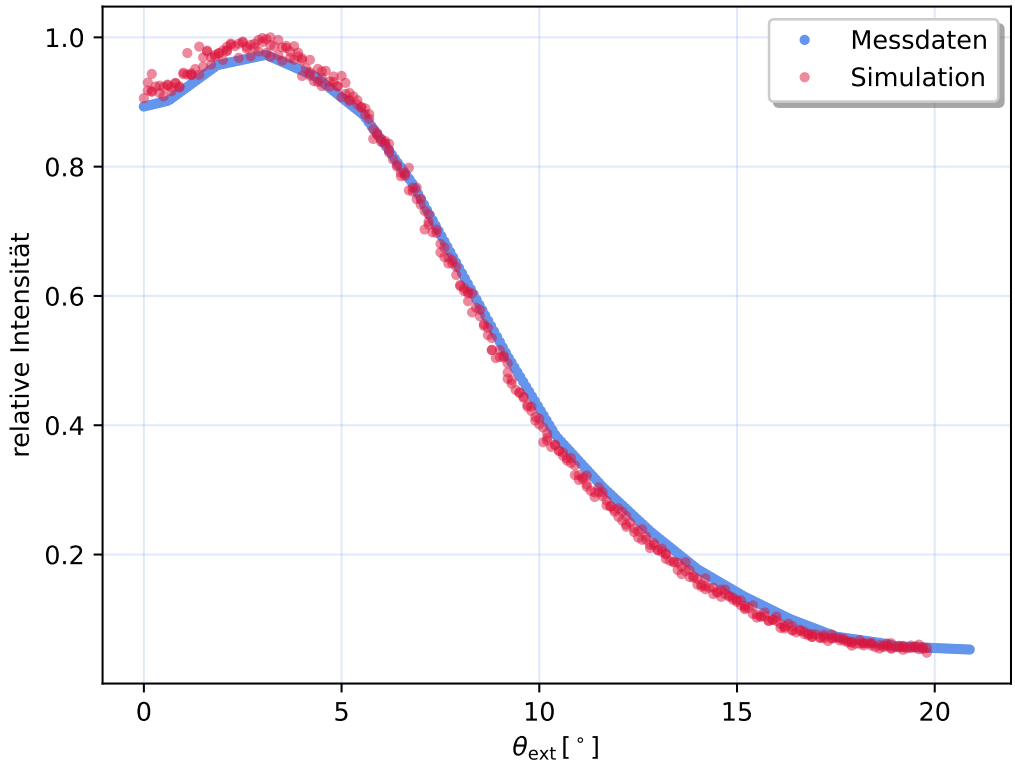


Abbildung 23: Überprüfung des Emissionsprofils, welches aus dem Experiment extrahiert und in die Simulation eingesetzt wurde, unter Beachtung der Brechung am LED-Körper sowie der Anpassung an Simulationsartefakte.

zusätzlich jenes Emissionsprofil, welches aus den drei Einzelmessungen gewonnen wurde (blaue Kurve) und in Abbildung 20 (unten) schon zu sehen ist, wobei hier eine Interpolation der Daten vorgenommen wurde. Die simulierte Kurve passt nicht exakt zur experimentellen, sondern zeigt geringe Abweichungen. Da die Photodiode im Experiment nicht punktförmig ist, sondern im gemessenen Abstand von 96 cm einen Winkeldurchmesser von etwa 0,7° besitzt, ist die Abstrahlcharakteristik nicht exakt für eine φ-Ebene detektiert worden. Diese geringe räumliche Ausdehnung ist bei der Gewichtung des Profils nicht beachtet worden, weshalb diese in Abbildung 23 zu sehende geringe Abweichung der simulierten Kurve zustande kommt.

Mit dem vorgestellten Verfahren der Umrechnung und Anpassung eines Emissionsprofils an die Simulation kann jedes beliebige Profil in die Simulation eingesetzt werden, vorausgesetzt, es wurde in einer konstanten φ - Ebene gemessen.
Für die durchgeführten Simulationen wurde mit dem in Abbildung 23 angepassten Emissionsprofil (rote Kurve) gearbeitet.

6.2 Bedingungen an und Toleranz der LEDs

An die LEDs, welche in den mDOMs enthalten sein werden, sind eine Reihe von Anforderungen gestellt, welche auch im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden werden nur die für diese Arbeit relevanten Bedingungen betrachtet. Die Informationen dieses Abschnitts wurden zur Verfügung gestellt [23]. Die Originalformulierungen sind im Anhang A zu finden.

Bei der Einsetzung der LEDs in das Modul besteht folgende Bedingung:

- Jede LED muss innerhalb 5° von ihrer nominellen Achse (LED-Achse) bleiben.

Für die Abstrahlcharakteristik gelten folgende Anforderungen:

- Die Abstrahlcharakteristik sollte glockenförmig sein
- Nahe der LED-Achse darf ein lokales Minimum entstehen, solange es nicht größer als 20 % und nicht breiter als 5° ist (gemessen von der LED-Achse bis zum Maximum).
- Die Standardabweichung σ darf 15° nicht überschreiten.
- Die Emission ab 2σ muss kleiner als 10 % der Gesamtemission sein.

Aus diesen Bedingungen geht hervor, dass das Emissionsprofil glockenförmig sein soll, auf der anderen Seite jedoch um die LED-Achse ein Minimum entstehen darf. Die Standardabweichung σ wird im hier so definiert, dass die Standardabweichung von einem Gaußfit berechnet wird. Dazu werden die Daten ab dem Maximum zu negativen Winkeln gespiegelt, um so eine gaußförmige Verteilung zu erhalten. Bei dem Fit wird das lokale Minimum um $\vartheta = 0^\circ$ herum missachtet.

Die LEDs sind in die Haltestruktur eingelassen. An der Unterseite der LEDs befindet sich die Elektronik. Die Platinen sitzen verkeilt in der Haltestruktur. Abbildung 24 zeigt eine Nahansicht des 3D-Modells des mDOMs. Zu sehen ist ein Blick vom Innern der Haltestruktur (hier grau). Die LED sitzt dabei kopfüber in einer Öffnung. Die Platine ist ebenfalls modelliert und wird von der Haltestruktur gehalten. Die Drähte, welche an den Unterseiten der LEDs befestigt sind und das Bindeglied zu den angrenzenden Platinen bilden, können dabei in der Länge variieren. Ebenso besitzen Haltestruktur

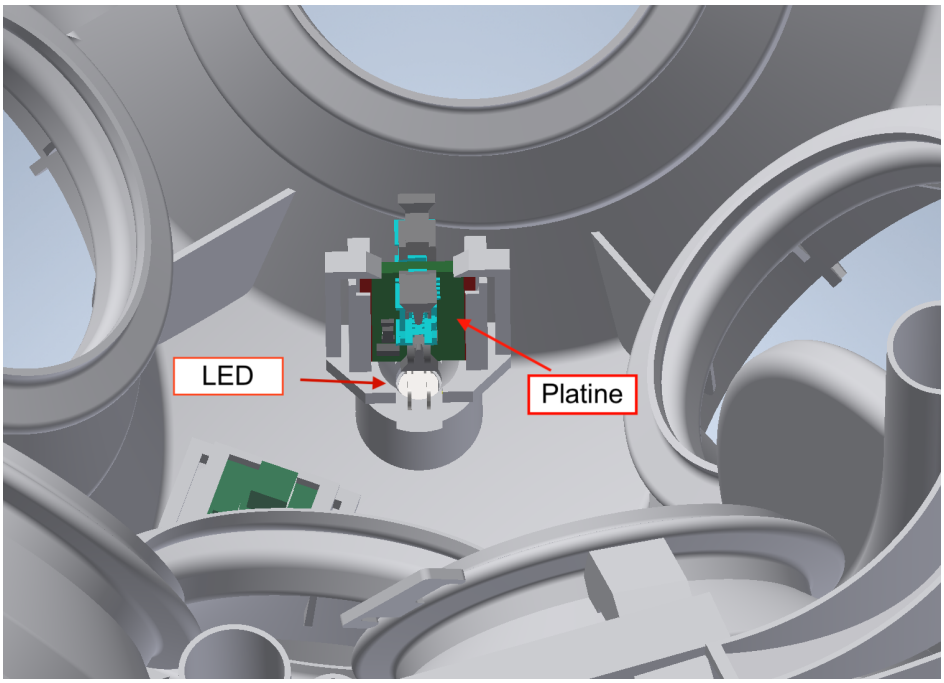


Abbildung 24: 3D-Modell der Haltestruktur. Die LED sitzt kopfüber mit der Platine an ihrer Unterseite [23].

sowie die Glasfenster Toleranzen, so dass der Abstand der LED zu dem Glasfenster selbst, welches sich über der LED befindet, ebenfalls variiert. Der theoretisch geringste Abstand ist der, wenn die LED das Glasfenster berührt. Für die Geometrie des mDOMs in Geant4 wurden die Platinen nicht berücksichtigt und daher nicht simuliert. In Abbildung 25 ist die Nahansicht des 3D-Modells mit Blick auf die Haltestruktur zu sehen. Zu sehen ist die Öffnung, in der die LED platziert wird. Hierbei ist zu erkennen, dass die LED in einer kegelförmigen Öffnung sitzt, wobei der Kegel genau umgekehrt liegt, wie der Kegel in Abbildung 24. Zwischen den Kegeln befindet sich ein zylindrisches Stück. Diese Geometrie ist in Abbildung 26 dargestellt, wobei hierbei die Platinen unberücksichtigt bleiben. Die Spitze der LED befindet sich in der zuvor erwähnten kegelförmigen Öffnung der Haltestruktur und ragt selbst unten etwas hinaus, wobei der Zylinder folgt. Die LED ist in blau angedeutet, die Geometrie der Haltestruktur in schwarz. Die skizzierten Winkel α und β geben die maximalen Kippwinkel an, bis die LED an den Rand der Haltestruktur stößt. Durch geometrische Beziehungen ergeben sich folgende Winkel:

$$\alpha = 5{,}3^\circ \quad \text{und} \quad \beta = 20{,}00^\circ,$$

wobei die eingezeichnete Größe H als 3 mm angenommen wird. Je größer H ist, desto kleiner wird der maximale Kippwinkel α. H hängt davon ab, wie groß der Abstand der LED zum darüberliegenden Glasfenster ist. Da $\alpha \ll \beta$, wird die LED durch α begrenzt. Um die Toleranz der LED zu simulieren, wurde für die Simulationen als minimaler Ab-

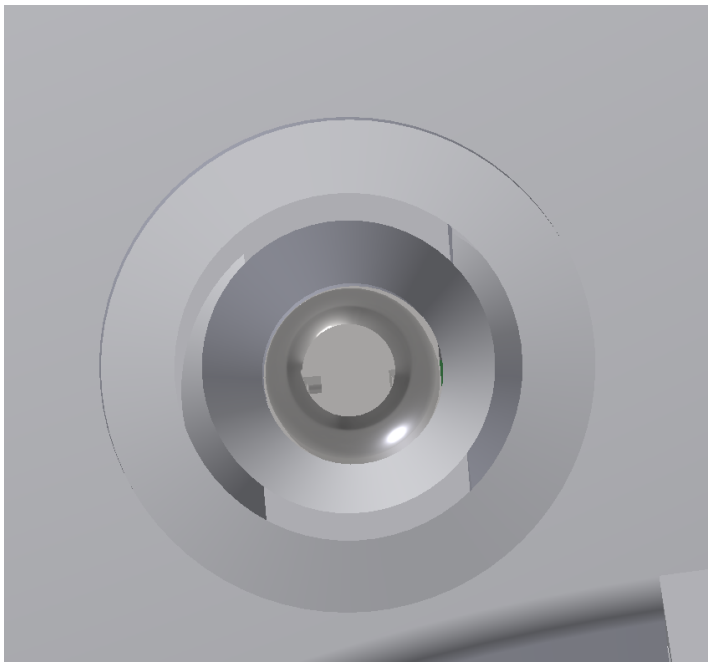


Abbildung 25: 3D-Modell der Haltestruktur. Der Blick fällt auf die kegelförmige Öffnung für die LED [23].

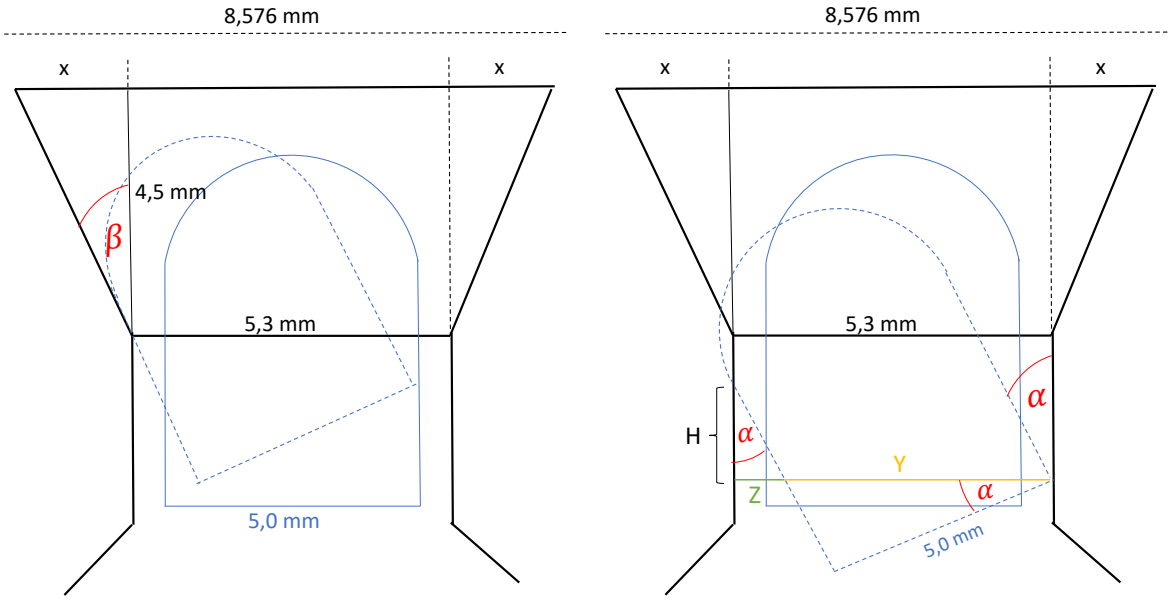


Abbildung 26: Geometrie der LED innderhalb der Haltestruktur. Skizziert ist hier, wie weit sich die LED kippen lässt, bis in durch die Haltestruktur begrenzt wird. Die skizzierten Winkel α und β sind hierfür ein Maß.

stand der LED zum darüberliegenden Glasfenster 0,01 mm und als maximaler Abstand 4,5 mm gewählt. Die Abstände beziehen sich auf den Abstand von der Spitze der LED zum Glasfenster und nicht auf den Abstand ab der Photonenquelle in der Mitte der LED. Dass als minimaler Abstand nicht das Berühren der LED mit dem Glasfensters gewählt wurde, liegt an Simulationsartefakten, die auftreten würden, wenn sich zwei Medien überschneiden.

6.3 Grenzflächen und Brechungsindizes

Die im Innern der LED emittierten Photonen werden an den Grenzflächen des mDOMs gebrochen. Die durchlaufenden Medien und ihre zugehörigen Brechungsindizes bei gegebener Wellenlänge $\lambda = 405\,\mathrm{nm}$ sind in der Abbildung 27 zusammengefasst.

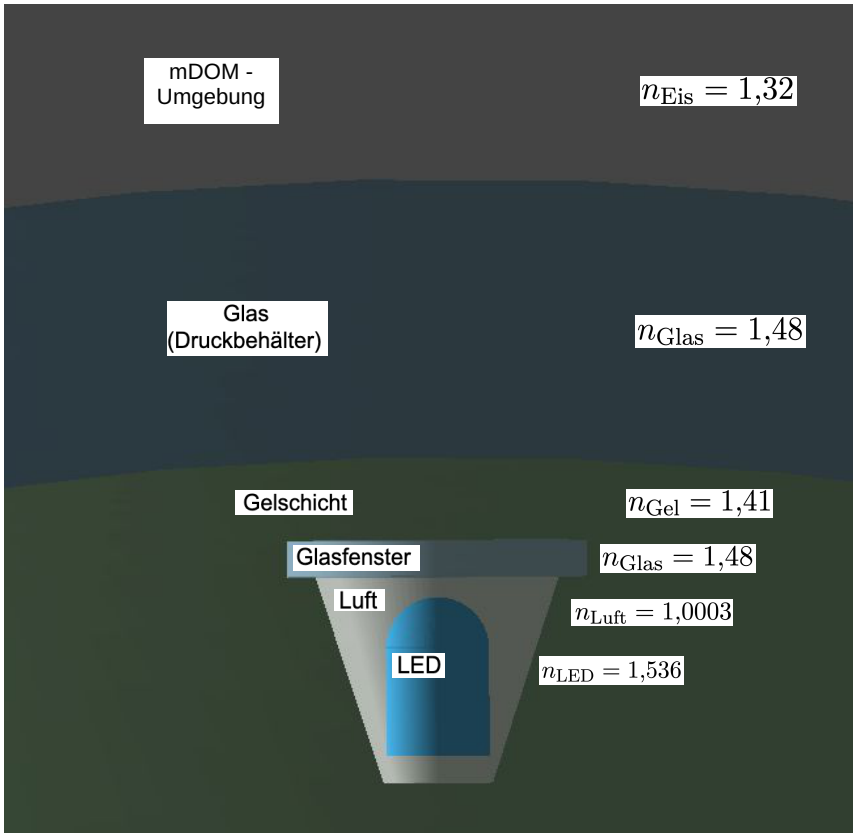


Abbildung 27: Medien des mDOMs und ihre zugehörigen Brechungsindizes.

7 Simulationsstudien

In diesem Kapitel werden die Auswertungen der verschiedenen Simulationen beschrieben, wenn die LED im mDOM platziert ist. Diskutiert werden die Einflüsse verschiedener Parameter, wenn die nominelle Richtung der LED senkrecht zu den Grenzflächen des mDOMs steht. Der Fall, dass die LED verkippt im Modul platziert ist, wird ebenfalls vorgestellt.

Um den Einfluss auf das Emissionprofil durch das mDOM zu untersuchen, wird innerhalb der Simulationen eine LED in das mDOM platziert (s. Kap. 6.1). Das mDOM umfasst insgesamt zehn LEDs, jedoch sitzen alle innerhalb des sphärischen Teils des Moduls und nicht im zylindrischen. Die nominellen Richtungen der LEDs stehen orthogonal zu allen Grenzflächen des Moduls „oberhalb“ der LEDs. Somit ist es für die Untersuchung nach dem Einfluss des Moduls unerheblich, welche von den zehn LEDs ausgewählt wird.
Die ausgewählte LED wird in Geant4 aktiviert, was beudetet, dass sie das Emissionsprofil im Innern ihres Körpers abstrahlt. Für alle Durchführungen der Simulation wurden immer fünf Millionen Photonen simuliert. Zur Untersuchung des abgestrahlten Emissionsprofils wurde eine Kugel in die *Welt* platziert, die als Medium Eis ohne Streuung und Absorption besitzt. In diese Kugel wurde das mDOM platziert, wobei der Mittelpunkt der Kugel nicht die Mitte des Moduls darstellte, sondern die Mitte der aktivierten LED. Damit liegt die Photonenquelle im Mittelpunkt der Kugel. Die fünf Millionen simulierten Teilchen passieren die Grenzflächen des mDOMs (LED-Körper, Glasfenster, Gelschicht, Druckbehälter) unter Brechung und propagieren dann ohne Richtungsänderung im Eis, bis sie die Kugeloberfläche durchstoßen, ihre kartesischen Koordinaten in eine Datei geschrieben und sie „zerstört“ werden und damit keinen weiteren Bestandteil der Simulation darstellen. Die simulierte Kugel dient damit nur dem Zweck, die Koordinaten der Photonen zu erhalten.
Wenn die LED ohne Verkippung im Modul platziert ist, ist der Aufbau rotationsinvariant und damit bleibt, trotz Brechung der Teilchen an den Grenzflächen, die Rotationssymmetrie erhalten. Das bedeutet, das Emissionsprofil ist auch außerhalb des Moduls rotationssymmetrisch. Außerhalb des Moduls kann das detektierte Profil demnach unabhängig von φ betrachtet werden, was praktisch eine Mittelung über alle φ bedeutet. Eine Möglichkeit besteht im Betrachten der **Intensitätsverteilung** der Photonen. Dafür werden aus den kartesischen Koordinaten, welche gespeichert werden, wenn die Photonen die simulierte Detektorkugel durchdringen, die Abstrahlrichtung der Photonen berechnet. Dabei entstehen demnach $\vartheta\varphi$ - Paare. Um eine Aussage über die Intensitätsverteilung zu treffen, ist es notwendig, die Anzahl der Photonen, mit anderen Worten die Anzahl der Winkelpaare in einem gewissen Flächenelement, pro Fläche zu betrachten, da es andernfalls zu einer Verzerrung aufgrund der Kugelgeometrie kommt. Die Fläche ergibt sich aus der Integration über einen Kugeloberflächenabschnitt:

$$A = \int_0^{2\pi} \int_{\vartheta_{\min}}^{\vartheta_{\max}} \mathrm{d}A\,, \qquad \mathrm{d}A = \sin\vartheta\,\mathrm{d}\vartheta\,\mathrm{d}\varphi$$

Die Integration über ϑ erfolgt von $\vartheta_{\min}$ bis $\vartheta_{\max}$ in 0,1°-Schritten. Damit ergeben sich auf der Kugeloberfläche Ringe der Breite $\vartheta = 0{,}1°$. Die Anzahl der Photonen pro Winkelbereich werden auf die Fläche normiert. Daraus resultiert eine Intensitätsverteilung, welche die Dichte der Photonen pro Winkelbereich repräsentiert.
Diese Methode ist, wie zuvor beschrieben, nur sinnvoll für die nicht verkippte LED, da die Auswertung über den vollen φ-Bereich von 0 bis 2π zur Rotationssymmetrie der Abstrahlung passt.

7.1 Einfluss des Einbaus

Durch die Einsetzung der LED in das mDOM wird die Abstrahlcharakteristik der LED beeinflusst. Der unmittelbare Vergleich des Abstrahlprofils der einzelnen LED in Luft und der im Modul eingesetzten LED ist in Abbildung 28 zu sehen. Beide Profile wurden in einem Abstand von 3 m von der LED detektiert. Die Abbildung dient als qualitativer Vergleich und Überblick, was der wesentliche Unterschied zwischen dem Profil einer einzelnen LED und dem einer LED im mDOM ist, wenn dieses von Eis umgeben ist. In den nachfolgenden Abschnitten wird beschrieben, wie die Kurven zustande kommen. Die abgebildeten Intensitätsverteilungen der beiden Emissionsprofile sind auf ihre eigene Fläche normiert, so dass sich eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ergibt. Insgesamt wurden bei beiden Simulationen insgesamt fünf Millionen Photonen emittiert. Durch Reflexion und Absorption am mDOM werden etwas mehr als 10 % der Photonen verloren. Der plötzliche Abfall bei beiden Profilen bei größeren Winkeln rührt daher, dass das simulierte Emissionsprofil außerhalb der LED nur bis etwa 21° reicht, darüber hinaus wird keine Intensität simuliert. Durch die Brechung an den Grenzflächen des mDOMs wird das Profil insgesamt zentriert, dieser Effekt ist in Abbildung 28 deutlich zu erkennen: Der Abfall findet schon bei etwa $\vartheta = 15°$ statt. Für die LED im mDOM sind in dieser Abbildung die folgenden Einstellungen vorgenommen worden: Zwischen der LED und dem Glasfenster befindet sich als Medium Luft, der Abstand zum Glasfenster von der LED-Spitze aus beläuft sich auf 1 mm, das umgebende Medium des mDOMs stellt Eis ohne Streuung und Absorption dar und der Radius, für welchen die Photonen detektiert wurden, beträgt 3 m.
In den nachfolgenden Abschnitten wird auf diese Einstellungen eingegangen und Variationen davon untersucht.

7.2 Änderung des Profils mit dem Abstand

Durch die Brechung am mDOM ist das Emissionsprofil außerhalb des Moduls betrachtet zentrierter als es im Innern der LED emittiert wird (vgl. Abb. 28). Dadurch wird

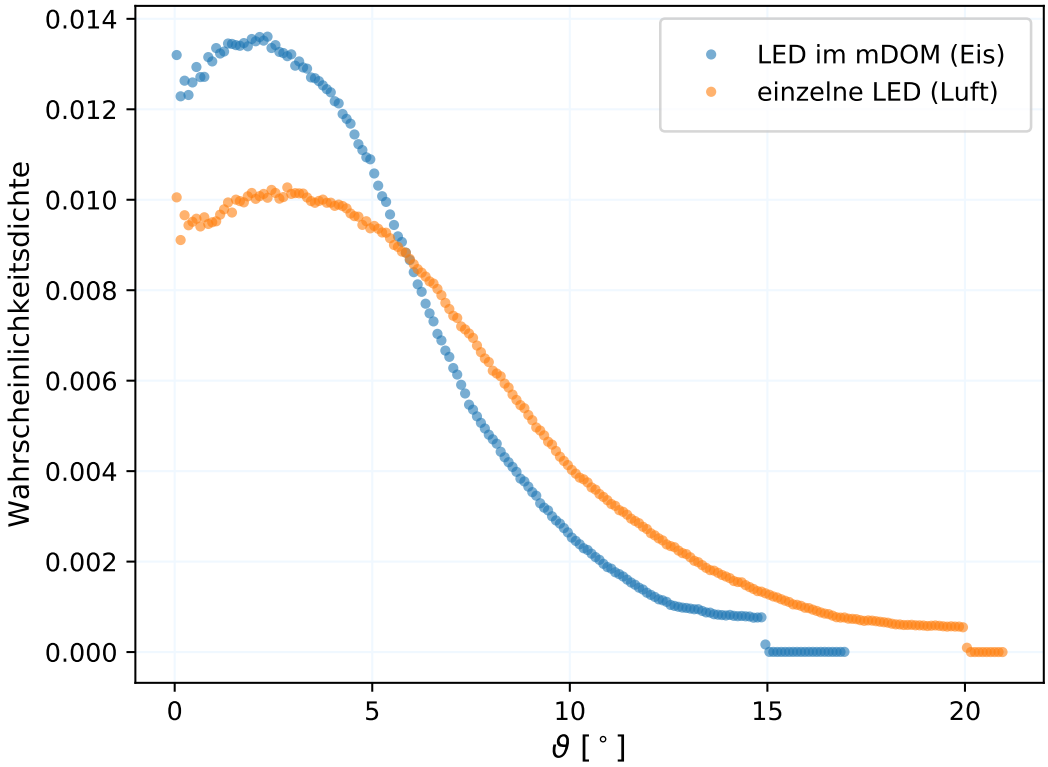


Abbildung 28: Intensitiätsverteilungen des Emissionsprofils einer einzelnen LED in Luft und des Emissionsprofils, wenn die LED im mDOM platziert ist und dieses von Eis umgeben ist. Bei beiden Profilen wurden 5 Millionen Photonen simuliert und in 3 m Abstand detektiert. Durch Absorption und Reflexion im mDOM werden etwa 10 % der Photonen verloren. Die Intensitiätsverteilungen sind jeweils normiert dargestellt.

effektiv jedes einzelne Photon mit einem größeren Winkel emittiert als außerhalb des Moduls detektiert. Die Brechung der einzelnen Photonen bedingt allerdings einen weiteren physikalischen Effekt, der zu beachten ist: Die Strahlen der Photonen scheinen außerhalb des Moduls nicht von einer Punktquelle zu kommen, sondern von einem „verschmierten“ Punkt [9]. Die virtuellen Ausgangspunkte der detektierten Photonen außerhalb des Moduls liegen in einem ausgedehnten Bereich auf der z-Achse. Auch wenn die Photonen insgesamt Richtung Zenit gebrochen werden, ist nicht sichergestellt, dass die virtuellen Ausgangspunkte der Photonen unterhalb des eigentlichen Ursprungs liegen. Durch das Aufnehmen der Richtungsvektoren der Photonen in Geant4, können jedoch die Schnittpunkte mit der z-Achse berechnet werden, um genau das zu überprüfen. Durch die unterschiedlichen Schnittpunkte mit der z-Achse ändert sich das Strahlungs-

[9] Dieser Effekt greift auch bei der einzelnen LED ohne das mDOM, ist dort allerdings kleiner.

feld der Photonen mit dem Abstand zum mDOM. Als Folge verändern sich die mit der z-Achse eingeschlossenen Winkel eines einzelnen Strahls außerhalb des Moduls mit dem Abstand.
Durch die unterschiedlich starke Brechung je nach emittierten Winkel, werden Photonen nahe der z-Achse, also Photonen mit kleinerem Emissionswinkel, weniger stark abgelenkt. Um die Änderung des Winkels mit dem Abstand zu untersuchen, wurde in Geant4 jeweils ein einzelnes Photon für einen bestimmten Emissionswinkel simuliert und außerhalb des Moduls für verschiedene Abstände detektiert. Im Folgenden werden nur die Änderungen des Winkels mit dem Abstand für ein einzelnes Photon mit einem Emissionswinkel von 1 ° und eines mit einem Emissionswinkel von 25 ° betrachtet. Letzteres entspricht außerhalb des Moduls aufgrund der Brechung einem Winkel von etwa 14 °.
Um das Profil, beziehungsweise die einzelnen Photonen, außerhalb des mDOMs aufzunehmen, sind die Photonen, wie zu Beginn dieses Kapitels beschrieben, mithilfe einer simulierten Kugel detektiert worden. Für die Detektion der Photonen muss jedoch noch überprüft werden, in welchem Abstand vom mDOM das Emissionsprofil noch sinnvoll detektiert werden kann. Dabei muss sichergestellt sein, dass der Radius dieser Kugel groß genug ist, das gesamte Profil zu detektieren. Eine kurze Rechnung ergibt, dass der Radius mindestens 27 mm betragen muss, um das Profil bis $\vartheta = 20\,°$ zu detektieren, wenn der Abstand der LED bis zur mDOM-Oberfläche etwa 23 mm beträgt.

7.2.1 Eis als mDOM-Umgebung

Beträgt die mDOM-Umgebung Eis ohne Streuung und Absorption als Medium, so liegen alle virtuellen Emissionspunkte der Photonen unterhalb des tatsächlichen Ursprungs. Als Folge werden die mit der z-Achse eingeschlossenen Winkel, gemessen vom tatsächlichen Ursprung aus, eines einzelnen Strahls außerhalb des Moduls betrachtet kleiner, je größer der Abstand wird. In hinreichend großer Entfernung wird dieser Winkel jedoch nahezu konstant, das heißt, er nähert sich einem Grenzwert an. Skizze 29 zeigt die geschilderte Situation. Dabei sind die Brechungen zwischen der LED und der mDOM Oberfläche nicht skizziert. Strahl a wird im Ursprung, und damit im Innern der LED emittiert. Strahl b zeigt den Strahl außerhalb des Moduls nach den Brechungen. Wird Strahl b verlängert, so findet der Schnittpunkt mit der z - Achse unterhalb des Ursprungs statt. Je weiter weg vom Modul, desto kleiner werden die mit der z - Achse eingeschlossenen Winkel ($\delta < \gamma$).
In Abbildung 30 ist die Änderung des Winkel mit dem Abstand zur Lichtquelle für ein einzelnes Photon zu sehen, das zum einen mit $\vartheta = 1\,°$ (oben) und zum anderen mit $\vartheta = 25\,°$ (unten) im Innern der LED emittiert wurde. Die einzelnen Punkte zeigen den Winkel der Photonen bezüglich der LED - Achse bei einem bestimmten Abstand zur Lichtquelle. Die Winkelabnahme geschieht rasch bei kleinen Abständen. Bei einem Emissionwinkel von $\vartheta = 1\,°$ liegt die Änderung des Winkel zwischen dem minimalen Ab-

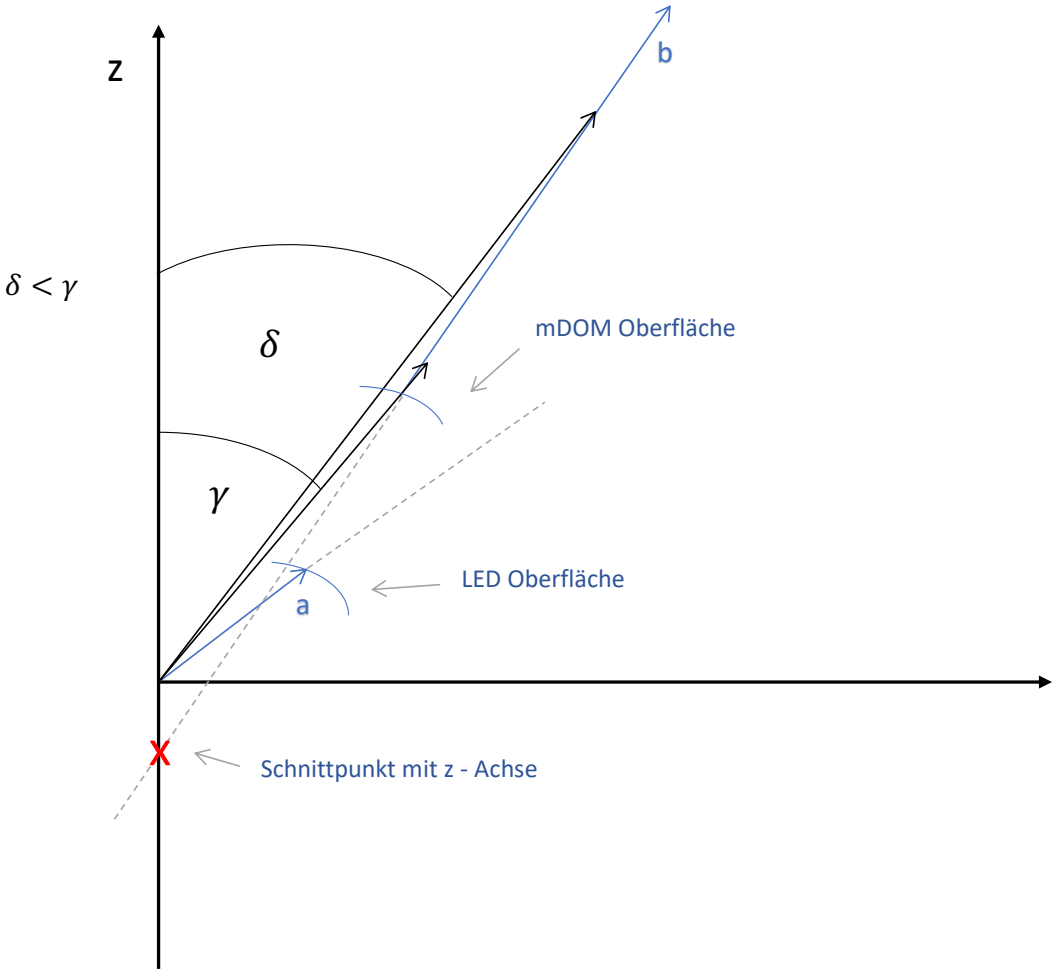
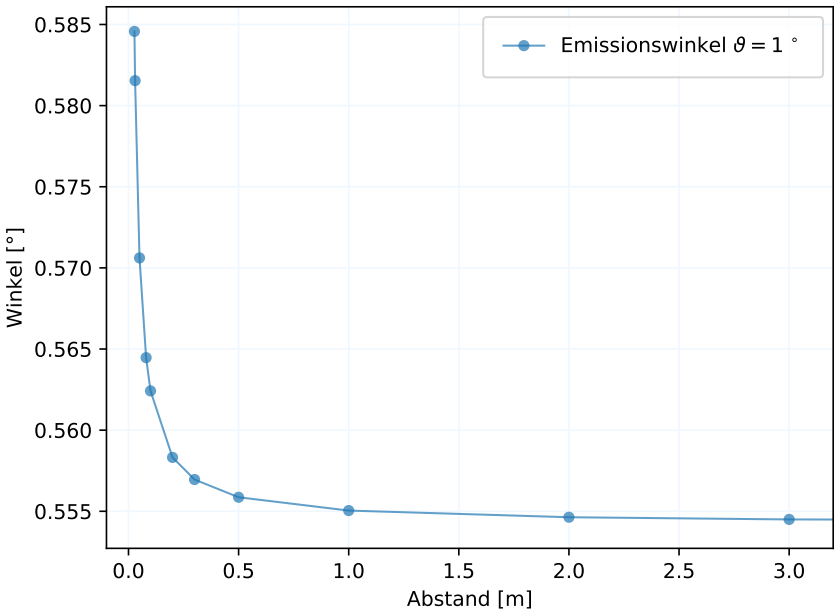


Abbildung 29: Änderung des Winkels mit dem Abstand x, wenn Eis das mDOM umgibt. Je größer x, desto kleiner wird der mit der z - Achse eingeschlossene Winkel. Der Strahl a kennzeichnet die Trajektorie des emittierten Photons innerhalb der LED, während Strahl b die Trajektorie desselben Photons außerhalb des Moduls beschreibt.

stand zur Lichtquelle von 2,7 mm bis 3 m bei 0,003°, während bei einem Emissionwinkel von $\vartheta = 25°$ der Unterschied zwischen diesem Abstand 0,689° beträgt (vgl. Abb. 30). Da die Photonen mit kleineren Emissionswinkeln nicht so stark gebrochen werden wie die mit größeren Winkeln, ist der Unterschied für einen Emissionswinkel von $\vartheta = 25°$ so viel größer als der mit $\vartheta = 1°$ (vgl. Abb. 30). Zur deutlicheren Anschauung wurden die Punkte miteinander verbunden. Zwischen einem Abstand von 3 m und 100 m ändert sich der Winkel für das mit $\vartheta = 1°$ emittierte Teilchen nur noch um 0,0003°. Für das mit $\vartheta = 25°$ emittierte Teilchen ändert sich der Winkel in diesem Abstand um 0,006°. Diese geringen Werte zusammen mit Abbildung 30 zeigen, dass sich das Strahlungsfeld in den für IceCube kleinsten relevanten Abstand - 3 m zum nächsten Modul vertikal - nicht mehr nennenswert ändert und der Effekt - je nach Fragestellung - vernachlässigt werden kann.



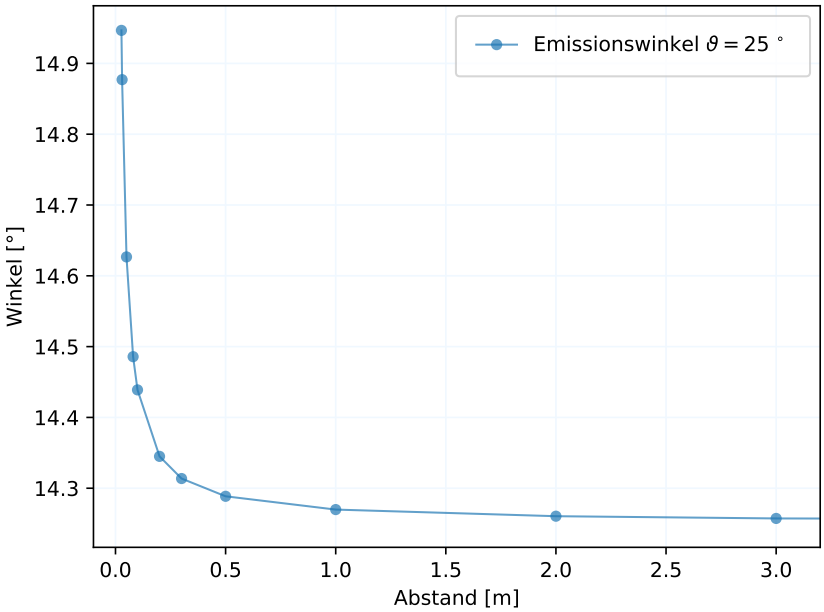


Abbildung 30: Abhängigkeit des Winkels vom Abstand, wenn ein Photon im Innern der LED mit einem Winkel von 1° (**oben**) bzw. 25° (**unten**) emittiert wird und außerhalb des Moduls in der Umgebung Eis detektiert wird. Je größer der Abstand, desto kleiner die Winkel. Ab einem Abstand zur Photonenquelle von 3 m bis 100 m ändert sich der Winkel nur noch um 0,0003° (oben) bzw. 0,006° (unten).

Wie sich die Änderung des Winkels mit dem Abstand auf die Intensitätsverteilung des Emissionsprofils der LED auswirkt, ist der Abbildung 31 zu entnehmen. Abgebildet sind die Intensitätsverteilungen für verschiedene Abstände zum mDOM, wenn das

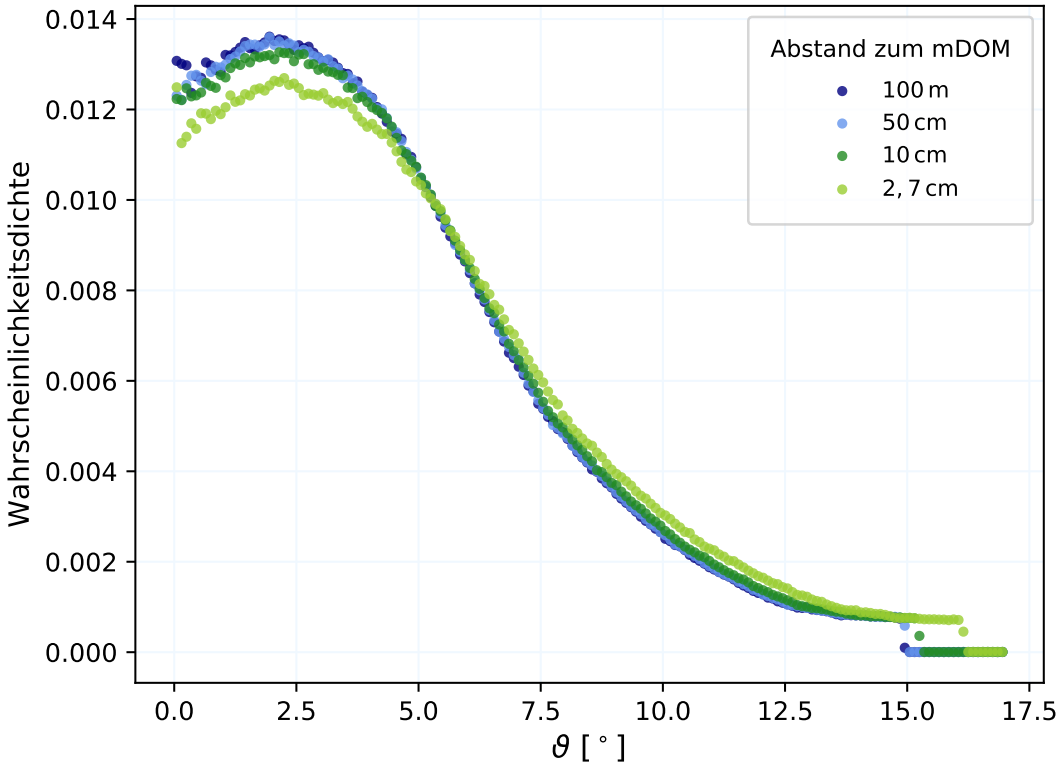


Abbildung 31: Intensitätsverteilung des Emissionsprofils in verschiedenen Abständen zum mDOM mit Eis ohne Streuung und Absorption als Umgebungsmedium. Die Angaben zum Abstand beziehen sich auf den Abstand zur Photonenquelle. Diese betrug in den Simulationen einen Abstand von 23 mm zur mDOM Oberfläche. Ab einigen Zentimetern bis wenigen Metern nähern sich die Verteilungen einander an und verändern sich kaum mehr.

umgebende Eis keine Streuung und Absorption enthält. Genauer genommen beziehen sich die Abstandsangaben auf den Abstand von der Punktquelle bis zur Detektion. Der Abstand der Punktquelle bis zur mDOM Oberfläche variiert mit dem Abstand der LED zum darüberliegenden Glasfenster. Für die Simulationen, woraus die Intensitätsverteilungen aus Abbildung 31 resultieren, beträgt der Abstand 23 mm. Während für wenige Zentimeter Abstand zum mDOM die Abweichung zu großen Entfernungen noch deutlich zu erkennen ist, ist die Annäherung an ein sich nicht veränderndes Profil mit zunehmenden Abstand bereits bei 50 cm Entfernung zur Photonenquelle zu sehen. Wie bereits erwähnt, hat die Änderung des Strahlungsfeldes der Photonen mit dem Abstand für hinreichend große Abstände keinen starken Einfluss mehr.

Eis mit Streuung und Absorption

Für den Fall, dass das umgebende Medium Eis mit denen am Südpol herrschenden Bedingungen beträgt (vgl. Abschn. 3.4), ändert sich das Emissionsprofil ebenfalls mit dem Abstand, da die Photonen durch die unterschiedliche Laufzeit durch die Mie-Streuung und durch Absorption beeinflusst werden. Die Tiefe betrug in dieser Simulation mit diesem Eis 2278,2 m und die Wellenlänge $\lambda = 405\,\mathrm{nm}$. Die Intensitätsverteilungen für verschiedene Abstände zum Modul für diesen Fall sind der Abbildung 32 zu entnehmen. Für große Laufstrecken der Photonen ist hier der Einfluss der Streu- und Absorptions-

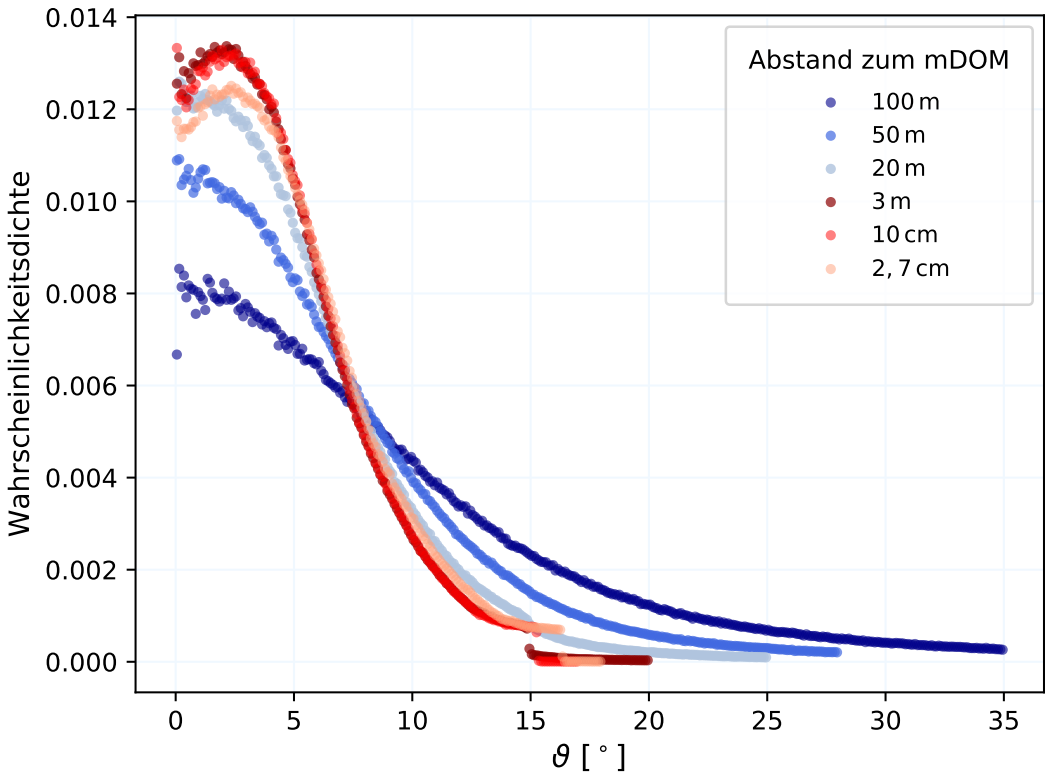


Abbildung 32: Intensitätsverteilung des Emissionsprofils in verschiedenen Abständen zum mDOM, wenn das umgebende Medium Eis mit Streuung und Absorption ist.

länge im antarktischen Eis zu erkennen. Für sehr kleine Laufstrecken ist der Einfluss des Eises mit Streuung und Absorption nicht zu erkennen im Vergleich zu Eis ohen diese Eigenschaften (vgl. Abb. 31. Je größer allerdings die Entfernungen werden, desto stärker kommt der Einfluss von Streuung und Absorption zum Vorschein. Mit Blick auf Abbildung 7 in Abschnitt 3.4 ist zu erkennen, dass in einer Tiefe von 2278,2 m und Wellenlänge von $\lambda = 405\,\mathrm{nm}$ die Absorption relativ gering ausfällt. Abbildung 32 zeigt vor allem die Streuung der Photonen: Die Abstrahlcharakteristik wird stark aufgewei-

tet je größer der Abstand wird, da die Photonen über diese großen Entfernungen stark und mehrfach gestreut werden.

7.2.2 Luft als mDOM-Umgebung

Die Untersuchungen mit den LEDs können im Labor nicht unter gleichen Bedingungen wie im antarktischen Eis vorgenommen werden, weshalb es für Laboruntersuchungen interessant ist, Luft als mDOM-Umgebung zu betrachten. Für diese Arbeit wird mit Luft als mDOM-Umgebung nur betrachtet, wie sich das Emissionsprofil der LEDs mit dem Abstand ändert. Ist das Modul von Luft umgeben, bleiben die Brechungen an allen Grenzflächen innerhalb der Moduls gleich, außer beim Übergang vom Modul zur Luft. Insgesamt wird das Profil jedoch ebenfalls geringfügig zentriert. Die Richtung

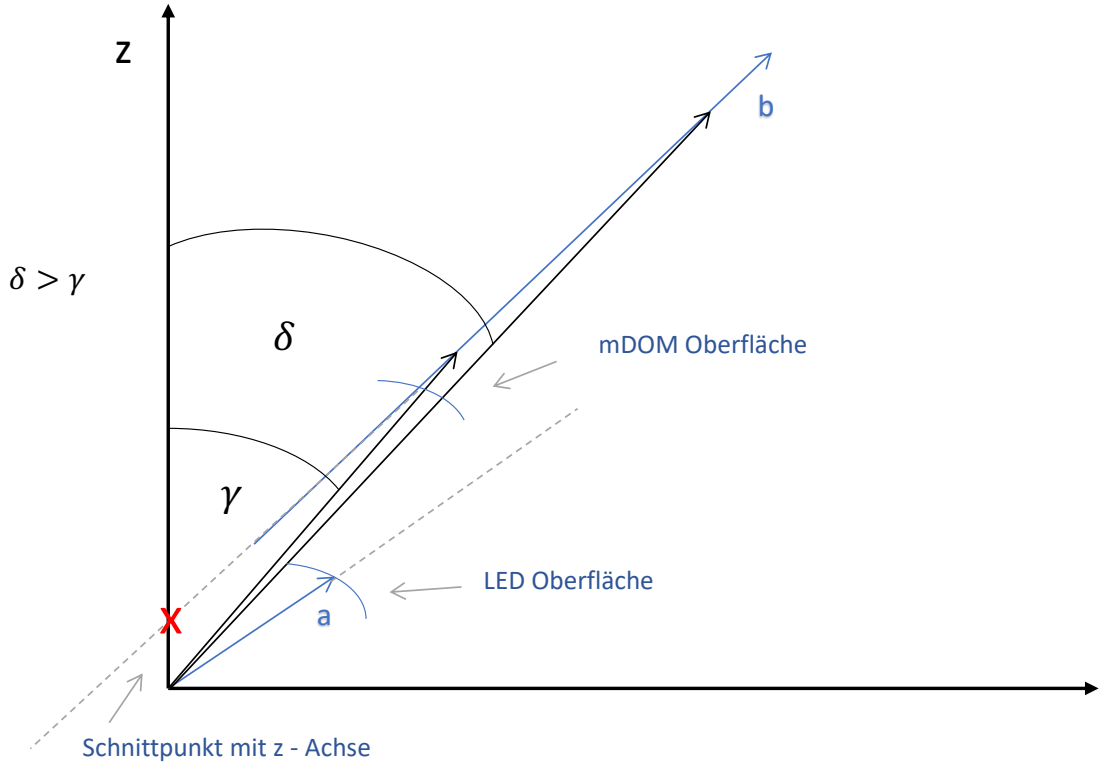


Abbildung 33: Änderung des Winkels mit dem Abstand x, wenn Luft das mDOM umgibt. Je größer x, desto größer wird der mit der z - Achse eingeschlossene Winkel. Der Strahl a kennzeichnet die Trajektorie des emittierten Photons innerhalb der LED, während Strahl b die Trajektorie desselben Photons außerhalb des Moduls beschreibt.

der Strahlen außerhalb des Moduls liefern jedoch - entgegengesetzt der Situation im Eis (vgl. weiter oben) - Schnittpunkte mit der z - Achse oberhalb des tatsächlichen Ursprungs. Damit liegen die virtuellen Emissionspunkte der Photonen alle oberhalb des Ursprungs, das zur Folge hat, dass die Winkel außerhalb des Moduls größer mit

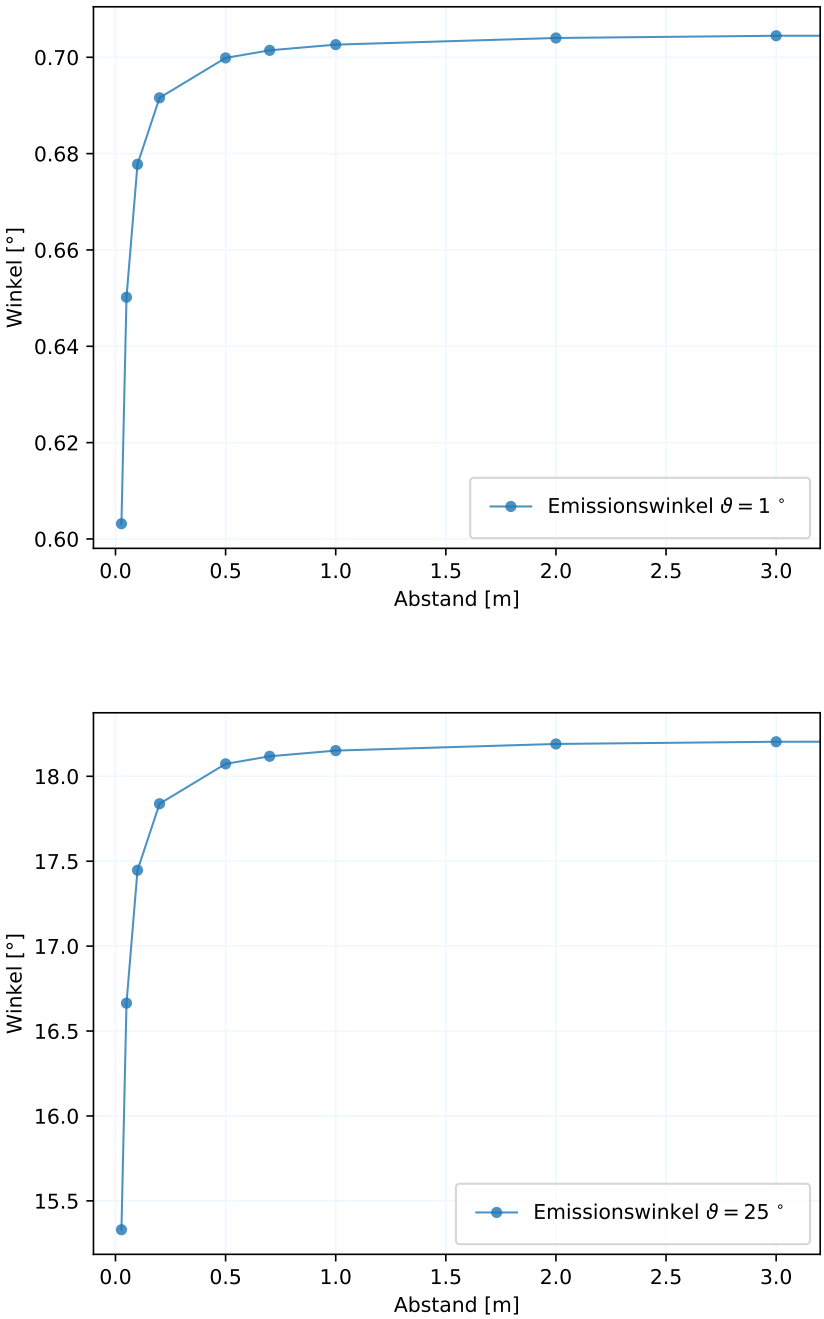


Abbildung 34: Abhängigkeit des Winkels vom Abstand, wenn ein Photon im Innern der LED mit einem Winkel von 1° (**oben**) bzw. 25° (**unten**) emittiert wird und außerhalb des Moduls in der Umgebung Luft detektiert wird. Je größer der Abstand, desto kleiner die Winkel. Ab einem Abstand zur Photonenquelle von 3 m bis 100 m ändert sich der Winkel nur noch um 0,001° (oben) bzw. 0,025° (unten).

dem Abstand werden. Skizze 33 verdeutlicht das Verhalten. Dabei sind erneut die Grenzflächen im mDOM nicht skizziert, nur die LED und mDOM Oberfläche. Strahl a kennzeichnet ein Photon, das im Innern der LED emittiert wurde, Strahl b stellt

die Richtung des Photons außerhalb des Moduls dar. Wird Strahl b verlängert, wird der Schnittpunkt mit der z-Achse oberhalb des Ursprungs gefunden und in der Folge werden die Winkel größer, je weiter weg das Photon vom Modul betrachtet wird ($\delta > \gamma$).

Die Änderung der Winkel mit dem Abstand sowie der Einfluss auf die Intensitätsverteilung des Profils sind in den den Abbildungen 34 und 35 zu sehen. Die Änderung des Winkel bei einen Emissionswinkel von $\vartheta = 1°$ bis 3 m liegt bei 0,101°. Für einen Emissionswinkel von $\vartheta = 25°$ sind es 2,873°. Zwischen 3 m bis 100 m liegen die Änderungen bei 0,001° (Emissionswinkel: $\vartheta = 1°$) und 0,025° (Emissionswinkel: $\vartheta = 25°$).

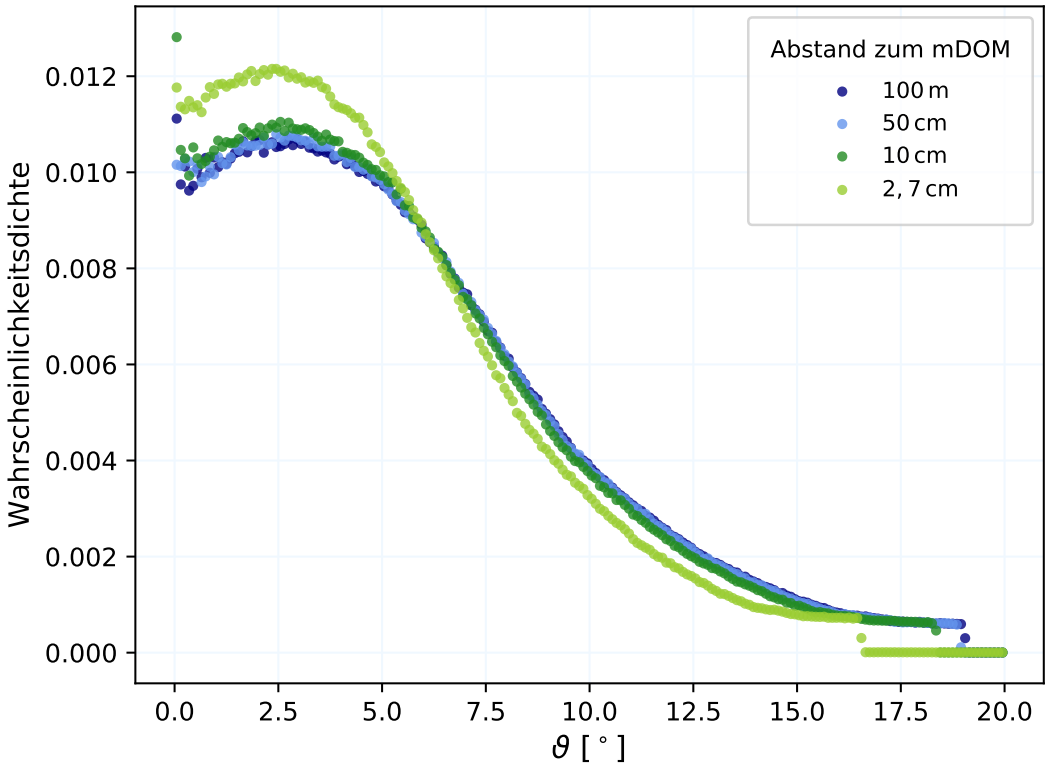


Abbildung 35: Intensitätsverteilung des Emissionsprofils in verschiedenen Abständen zum mDOM in Luft. Bereits ab einigen Zentimetern bis wenigen Metern nähern sich die Verteilungen einander an und verändern sich kaum mehr.

Für die folgenden Simulationen der LED im mDOM wurden aufgrund der oben genannten Erkenntnisse die Photonen alle in einem Abstand von 3 m zur LED detektiert. Folgendes dazu im nächsten Abschnitt.

7.3 Variation des Abstands LED - Glasfenster

Zeigt die nominelle Richtung der LED orthogonal zum Glasfenster im Modul, bleibt die Rotationssymmetrie des Emissionsprofils erhalten. Die Betrachtung der Intensitätsverteilung (s. zu Beginn des Kapitels) über alle φ-Richtungen ist damit legitim. Wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, kann der Abstand der LED zum darüberliegenden Glasfenster variieren. Abbildung 36 zeigt die Intensitätsverteilung des Emissionsprofils

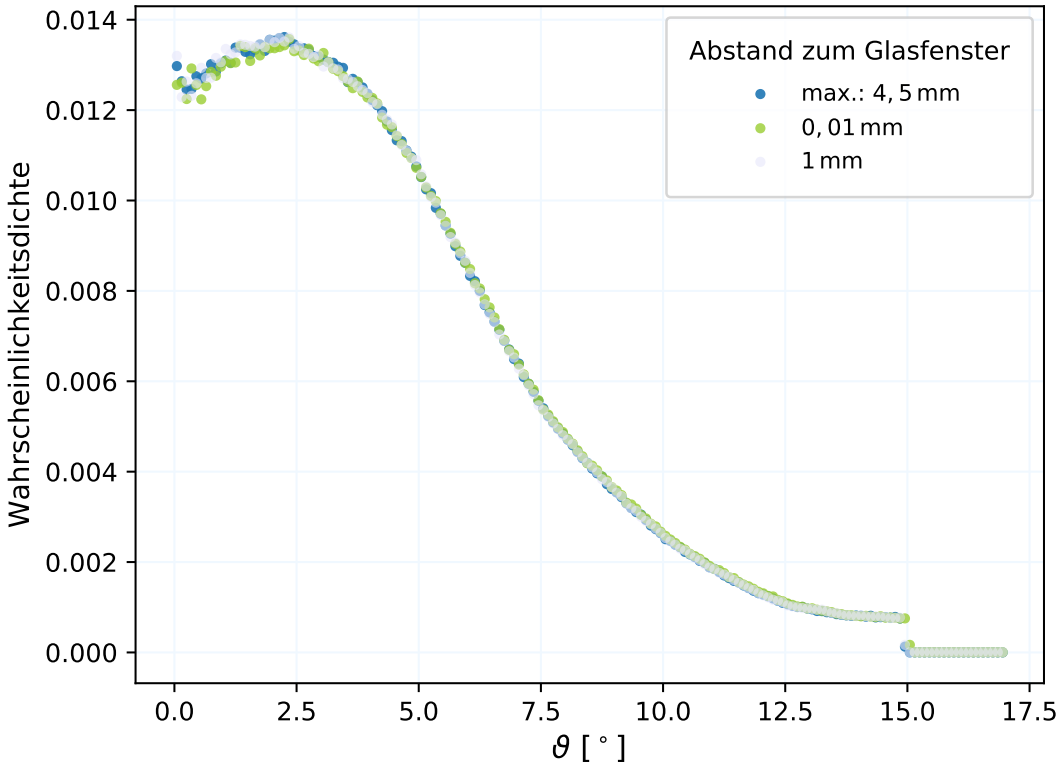


Abbildung 36: Intensitätsverteilung für verschiedene Abstände von der LED zum darüberliegenden Glasfenster. Der minimale Abstand stellt den dar, wenn die LED 0,01 mm unterhalb des Glasfensters mit der Spitze platziert ist. Qualitativ lässt sich hier wenig Unterschied zwischen den einzelnen Kurven erkennen.

außerhalb des Moduls für verschiedene Abstände zwischen der LED und dem Glasfenster, wobei das umliegende Medium Eis ohne Streuung und Absorption beträgt. Das Profil wurde in allen Fällen in einem Abstand von 3 m von der LED aufgenommen. Die einzelnen Punkte repräsentieren die Dichte an Photonen pro ϑ-Abschnitt der Breite 0,1° für φ von 0° bis 360°. Abgebildet sind verschiedene Verteilungen, je nachdem, in welchem Abstand die LED zum darüberliegenden Glasfenster steht. Der maximale Abstand (blaue Kurve) besteht, wenn die Spitze der LED auf derselben Höhe wie der Boden (Boden nur innerhalb der Simulation vorhanden) des Lochs liegt, in dem die LED platziert ist. Die LED liegt damit unterhalb des Lochs. Dieser Fall ist in Ab-

schnitt 6.2 erläutert. Der minimale Abstand besteht im Grunde, wenn die Spitze der LED das Glasfenster berührt, das aber aufgrund von Simulationsartefakten nicht simuliert wurde, sondern die LED unmittelbar unterhalb des Glasfensters platziert wurde, ohne das Glas zu berühren: 0,01 mm (grün). Ein Abstand dazwischen wurde zu 1 mm (lavenderfarben) gewählt. Die Verteilungen sind auf ihre jeweilige Fläche normiert. Für die Kurven ist qualitativ kaum ein Unterschied zu erkennen. Alle Verteilungen weisen für $\vartheta = 0°$ ein lokales Minimum auf, während einzelne Punkte um $\vartheta = 0°$ herum durch Schwankungen kommen. Die Maxima liegen alle um etwa $\vartheta = 2{,}5°$ (unten mehr dazu), ab diesen verzeichnen alle Verteilungen eine kontinuierliche Abnahme der Intensität. Während bei der einzelnen nur Brechung am LED-Körper auftritt und das umgebende Medium Luft ist, tritt bei der LED im mDOM Brechung an allen Grenzflächen des Moduls auf (s. Kap. 6.3) und das umgebende Medium ist in diesem Fall Eis. Wie in Abbildung 36 auch zu erkennen, wird der Lichtkegel des Emissionsprofils aufgrund der Brechung an den Grenzflächen im mDOM insgesamt zentriert: Während das Profil der einzelnen LED (Abb. 28) bis etwa $\vartheta = 21°$ strahlt, reicht es bei der LED im Modul nur bis etwa $\vartheta = 15°$. Dadurch ergibt sich bei kleinen Winkeln ein größeres Intensitätsmaximum als bei der einzelnen und das Maximum verschiebt sich leicht zu kleinen Winkeln hin.

7.4 Einfluss des Mediums zwischen LED und Glasfenster

Für die vorherig betrachteten Verteilungen des Emissionsprofils betrug das Medium zwischen der LED und dem darüberliegenden Glasfenster immer Luft. Über dem Glasfenster befindet sich die Gelschicht. Würde beim Anfertigen des Moduls Gel zwischen die LED und das Glasfenster gelangen, hätte dies Auswirkungen auf die Ausbreitung des Emissionsprofils. Dadurch, dass der Brechungsindex des Gels n_{Gel} einen ähnlich hohen Wert wie der der LED n_{LED} (s. Kap. 6.3) besitzt, fällt die Brechung bei dem Übergang von der LED zum Gel viel geringer aus als bei dem Übergang LED zu Luft. Das Emissionsprofil wird demnach bei dem Übergang von der LED zum Gel deutlich weniger zentriert, weshalb der Lichtkegel außerhalb des Moduls viel breiter ausfällt, wenn sich Gel anstatt Luft zwischen LED und Glasfenster befindet. Tatsächlich wird der Lichtkegel des Profils durch die weiteren Brechungen an den Grenzflächen des Moduls insgesamt aufgeweitet, im Gegensatz zu den vorherig betrachteten Fällen, bei denen das Profil insgesamt zentriert wurde. Dies zeigt und bestätigt Abbildung 37. Zu sehen sind die Intensitätsverteilungen für den Fall, dass sich Gel zwischen LED und Glasfenster befindet (grün) und für den Fall, dass sich Luft dazwischen befindet (blau). Zusätzlich ist die Verteilung einer einzelnen LED in Luft abgebildet (orange). Die Aufweitung des Profils, wenn Gel zwischen LED und Glasfenster gelangt, ist daran zu erkennen, dass die grüne Verteilung zu deutlich größeren Winkel gelangt als die orangefarbene und blaue. Dadurch verzeichnet die grüne Verteilung ein starkes Einbüßen der Intensität bei kleinen Winkeln.

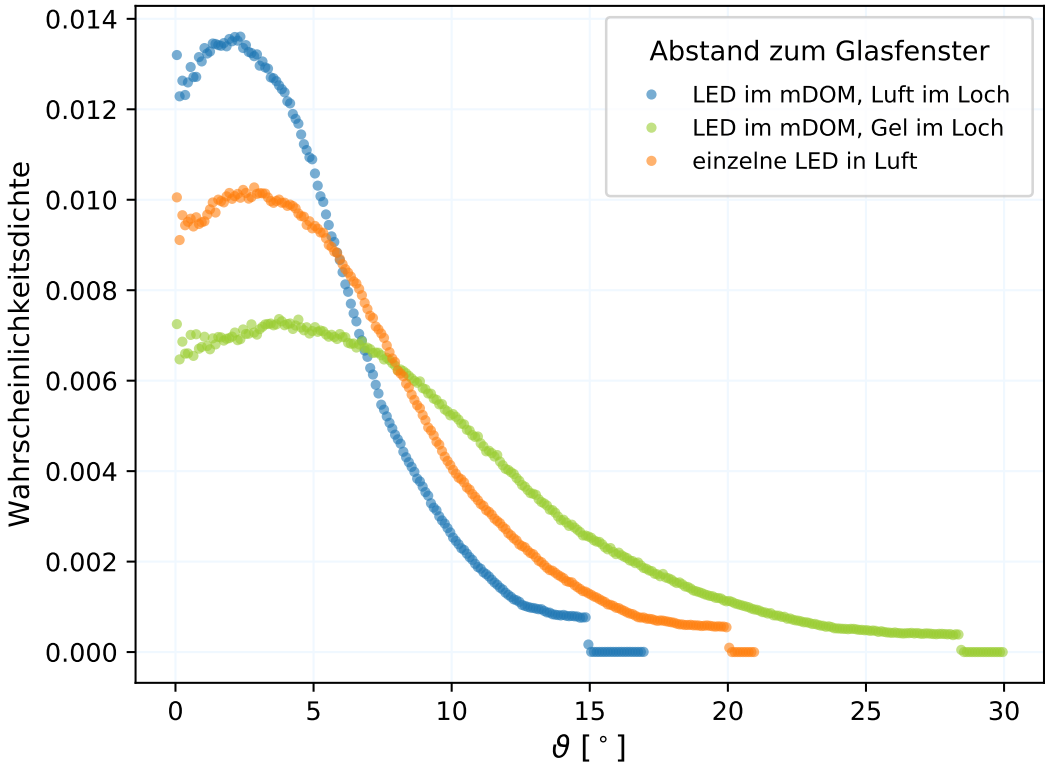


Abbildung 37: Intensitätsverteilung des Emissionsprofils, wenn sich zwischen LED und dem darüberliegenden Glasfenster Gel befindet (grün). Zusätzlich ist die Intensitätsverteilung des Profils abgebildet, wenn sich statt Gel Luft dazwischen befindet (blau) und ebenso die Intensitätsverteilung einer einzelnen LED in Luft (orange). Durch den deutlich größeren Brechungsindex des Gels findet zwischen der LED und dem Gel im Gegensatz zu Luft keine so starke Brechung statt, daher wird das Emissionsprofil insgesamt nicht zentriert, sondern viel mehr verbreitert. Das zeigt der direkte Vergleich der grünen mit der orangefarbenen Kurve: Die Intensität der grünen reicht zu viel größeren Winkeln.

Aufgrund von Begrenzungen innerhalb der Simulation, wurde der Fall simuliert, dass der gesamte Raum zwischen LED und Glasfenster mit Gel gefüllt ist. In der Realität wäre dies abgeschwächt: Wenn Gel dazwischen gelangt, würde dies nicht den gesamten Raum füllen.

Tabelle 2 fasst die quantitative Auswertung der diskutierten Intensitätsverteilungen zusammen. Hierbei werden die Bedingungen an die LED im mDOM überprüft, welche in Abschnitt 6.2 erläutert sind. Die Ergebnisse sind dabei nur für den maximalen Abstand zum Glasfenster - 4,5 mm - und für den Abstand unmittelbar unterhalb des Glasfensters - 0,01 mm - angegeben. Ferner sind die Ergebnisse für den Fall, dass Gel

Tabelle 2: Überblick der Ergebnisse zur Überprüfung der Bedingungen an die LEDs im mDOM. Die Ergebnisse sind für den minimalen (0,01 mm) und maximalen (4,5 mm) Abstand der LED zum Glasfenster aufgelistet sowie für den Fall, dass sich Gel zwischen der LED und dem Glasfenster befindet und für die einzelne LED in Luft.

Größe	0,01 mm	4,5 mm	Gel	Einzelne LED
Breite Minimum	$(2{,}24 \pm 0{,}05)^\circ$	$(2{,}20 \pm 0{,}05)^\circ$	$3{,}75^\circ$	$2{,}85^\circ$
Größe Minimum	$(7{,}22 \pm 0{,}24)\,\%$	$(7{,}53 \pm 0{,}23)\,\%$	$8{,}21\,\%$	$7{,}00\,\%$
σ	$(5{,}65 \pm 0{,}01)^\circ$	$(5{,}64 \pm 0{,}01)^\circ$	$(10{,}49 \pm 0{,}05)^\circ$	$(7{,}48 \pm 0{,}02)^\circ$
Emission ab 2σ	$(3{,}92 \pm 0{,}11)\,\%$	$(3{,}86 \pm 0{,}12)\,\%$	$(4{,}14 \pm 0{,}10)\,\%$	$(5{,}54 \pm 0{,}08)\,\%$

zwischen die LED und das darüberliegende Glasfenster gelangt und für die einzelne LED mit Luft als Umgebung aufgelistet.
Die Ergebnisse bilden für den minimalen und maximalen Abstand jeweils den Mittelwert aus zehn Datensätzen mit je Abstand 4,5 mm und 0,01 mm. Für alle zwanzig Simulationen wurden jeweils fünf Millionen Photonen simuliert und das Profil in 3 m Abstand detektiert. Die angegebenen Fehler u errechnen sich aus den Standardfehlern des Mittelwerts gemäß

$$u(x) = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n-1}},$$

wobei n die Anzahl der Datensätze angibt. Die Breite des Minimums wird gemessen von der LED-Achse ($\vartheta = 0^\circ$) bis zum Maximum. Der Wert gibt daher an, wo sich das Maximum befindet. Die Größe des Minimums bezeichnet den Intensitätsunterschied zwischen dem lokalen Minimum und dem Maximum. Bei der Berechnung dieser Größe wurde aufgrund der Schwankungen um $\vartheta = 0^\circ$ zunächst der Mittelwert der ersten fünf Intensitätspunkte eines Datensatzes ermittelt. Dieser gemittelte Wert stellt somit den minimalen Intensitätswert des lokalen Minimums dar. Die Standardabweichung σ wird aus einem Gaußfit gemäß

$$A \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

mit der Amplitude A und der Verschiebung μ, extrahiert. Für den Fit wurden die ϑ-Daten zu negativen Werten gespiegelt und das lokale Minimum um $\vartheta = 0^\circ$ herum wurde für den Fit nicht beachtet. Die Emission ab dem 2σ gibt an, wie viel Prozent der gesamten Intensität ab diesem Bereich noch strahlen.
Abbildung 38 zeigt die genannten Parameter. Dabei ist der typische Verlauf der Abstrahlcharakterisitk skizziert. Die in Tabelle 2 aufgeführten Ergebnisse der Emissionsprofile für verschiedene Abstände der LED zum Glasfenster dienen zur Überprüfung

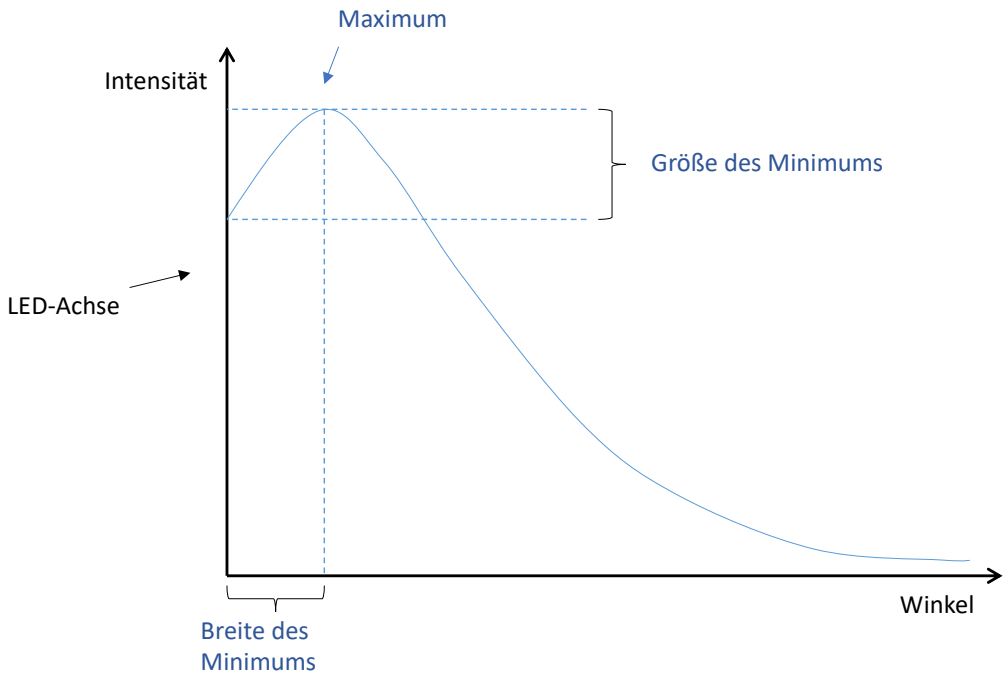


Abbildung 38: Parameter zur Überprüfung der Bedingungen an die LED.

der in Abschnitt 6.2 aufgeführten Anforderungen an das Emissionsprofil. Alle aus der Simulation erhaltenen Emissionsprofile weisen ein lokales Minimum um die LED-Achse herum auf, welches $\vartheta = 5°$ nicht überschreitet. Diese Minima liegen alle im Bereich der erlaubten Größe von 20 %. Wird von den lokalen Minima abgesehen, gleichen alle Profile einer gaußförmigen Verteilung. Die Standardabweichungen sind im Vergleich des erlaubten Werts relativ klein. Die Emission ab 2σ liegt ebenfalls unterhalb des erlaubten Werts von 10 %.
Aus der Tabelle 2 geht hervor, dass es keinen Einfluss auf die Ergebnisse gibt, wenn der Abstand zwischen der LED zum Glasfenster variiert. Geringe Abweichungen in Tabelle 2 können durch statistische Schwankungen zustande kommen.

7.5 LED verkippt

Sitzt die LED verkippt im mDOM, steht die nominelle Richtung nicht mehr orthogonal zu den Grenzflächen des Moduls und die Rotationssymmetrie des Emissionsprofils wird gebrochen. Durch die Symmetrie des Aufbaus spielt es keine Rolle, in welche Richtung die LED verkippt wird. In dieser Arbeit wurde die LED - Achse um die y - Achse gedreht. Dies entspricht einer Verkippung der LED in die $\varphi = 0°$ - Richtung.

Die aus der Simulation in Geant4 erhaltenen kartesischen Koordinaten des Emissionsprofils werden wie zuvor zu Kugelkoordinaten umgerechnet. Für eine bestimmte φ - Richtung werden die Photonen gezählt, welche sich, angelehnt an das Experiment, in einem kreisrunden Bereich mit Winkeldurchmesser 0,7° befinden. Dies entspricht

dem Winkeldurchmesser der Photodiode im Experiment. Der Bereich wird sozusagen für eine feste φ - Richtung in ϑ - Richtung „bewegt“, in 0,7°- Schritten, so dass sich dieser Bereich nicht überlappt und keine Photonen zweifach gezählt werden. Bei jedem Schritt wird die Anzahl der Punkte, das heißt die Winkelpaare, welche sich in diesem Bereich befinden, welche die Anzahl der Photonen repräsentieren, gezählt. Wenn die LED nicht verkippt im mDOM platziert ist, bleibt die Rotationssymmetrie des Emissionsprofils bestehen. Mit dieser Methode des **„Rastern“** ist damit zu erwarten, dass dieselbe Verteilung der Winkelpaare für unterschiedliche φ - Richtungen vorzufinden ist. Ist die LED allerdings verkippt, kann mithilfe dieser Methode der Einfluss auf die φ - Abhängigkeit untersucht werden.

Für die Simulationen mit der verkippten LED wurde Eis ohne die Eigenschaften am Südpol als Umgebung des mDOMs gewählt, zwischen der LED und dem Glasfenster Luft, die Photonen wurden in 3 m Abstand zur Quelle detektiert und der Abstand der LED zum Glasfenster auf 1 mm eingestellt.
Die LED wurde von $\vartheta = 1°$ bis $\vartheta = 5°$ in 2° - Schritten sowie für $\vartheta = 10°$, $\vartheta = 15°$ und $\vartheta = 20°$ in die $\varphi = 0°$ - Ebene gekippt. Dies entspricht einer Drehung um die y - Achse. Die Drehung wird durch $\varphi = 0°$ und dem Kippwinkel ϑ definiert.

Eine Möglichkeit der Darstellung der Drehung der LED ist die Betrachtung einer Projektion in z - Richtung. Die xy - Koordinaten, welche auf der Kugeloberfläche der simulierten Kugel erhalten werden, wie zu Beginn dieses Kapitels beschrieben, werden in die xy - Ebene projeziert. Abbildung 39 zeigt diese Projektion für eine Drehung um $\vartheta = 1°$ bis $\vartheta = 5°$ in 2° - Schritten sowie um $\vartheta = 10°$, $\vartheta = 15°$ und $\vartheta = 20°$. Die Photonen werden auf einer Kugeloberfläche detektiert, jedoch dann in die xy - Ebene projeziert. Dadurch kommt es zu einer Verzerrung in der Darstellung. Da die Daten jedoch innerhalb etwa $\vartheta = 30°$ bleiben und für kleine Kippwinkel sogar deutlich unter $\vartheta = 20°$, bleibt die Projektion in die Ebene relativ verzerrungsfrei. In den einzelnen Plots in Abbildung 39 ist die Verzerrung nur minimal für größere Kippwinkel zu erkennen. Für eine Drehung um $\vartheta = 20°$ ist noch am stärksten zu erkennen, dass die detektierten Photonen weiter entfernt des Koordinatenursprungs zentrierter als nahe des Ursprungs sind, so dass Richtung Koordinatenursprung die Verteilung entzerrter ist. Mit anderen Worten, der scheinbare Mittelpunkt der kreisrunden Verteilung, rückt aus der Mitte heraus nach rechts. Im Innern der Verteilung ist ein lokales Minimum zu erkennen, was sich mit den Beobachtungen des Emissionsprofils in den vorherigen Abschnitten deckt. Eine Verschiebung des Abstrahlprofils durch die Drehung der LED ist deutlich zu erkennen und ist stärker, je weiter die LED gedreht wurde. Der Koordinatenursprung ist mit einem schwarzen (weißen) Kreuz markiert, um eindeutig erkennen zu geben, wie stark die Verteilung verschoben wird. Die Verschiebung verläuft in positive x - Richtung, da die LED um die y - Achse gedreht wurde.
Durch die Drehung der LED, trifft das Abstrahlprofil schräg auf das Glasfenster. Infol-

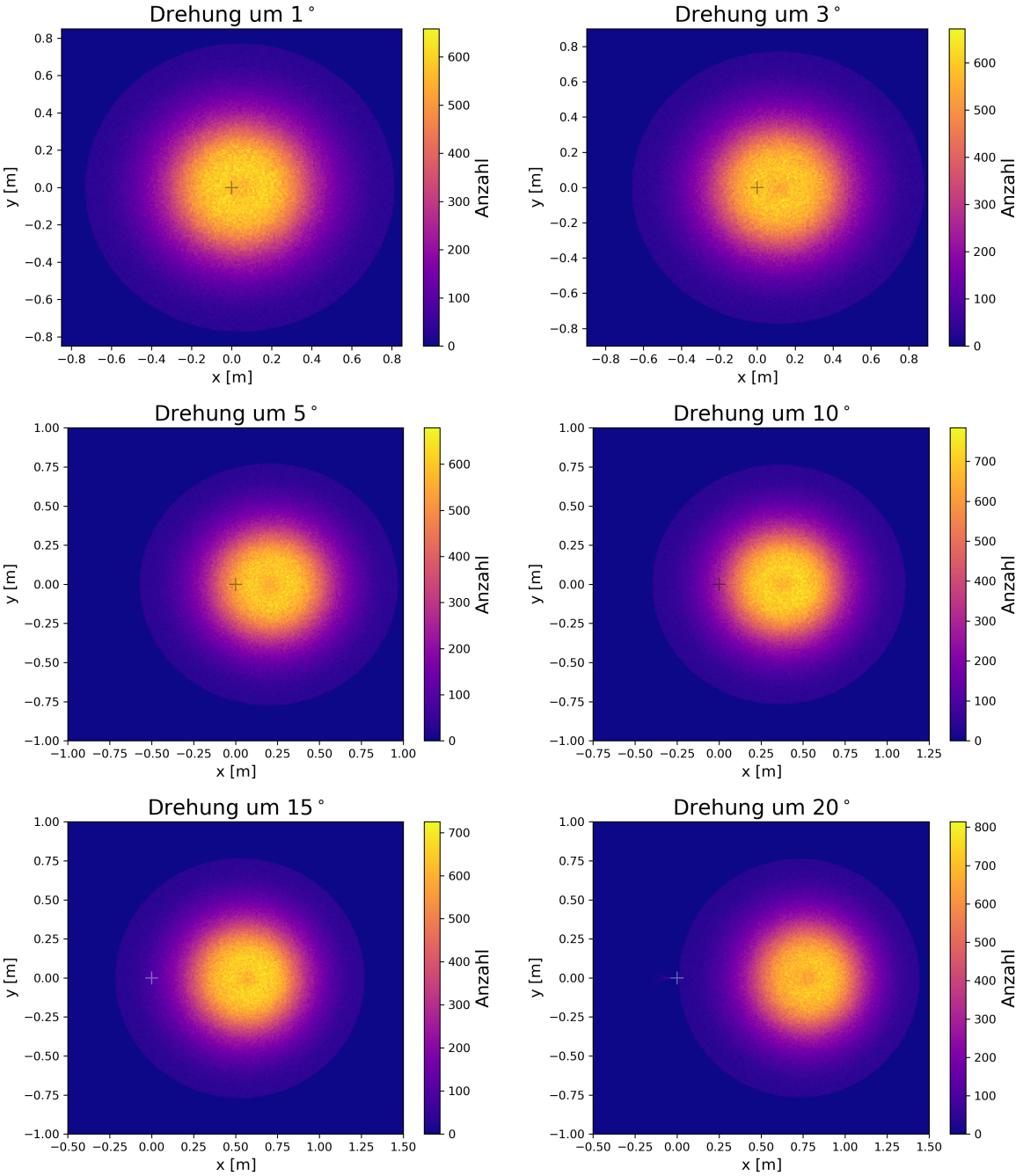


Abbildung 39: Projektion in z-Richtung für unterschiedliche Kippwinkel. Das schwarze (weiße) Kreuz markiert den Koordinatenursprung. Je größer die Verkippung der LED ist, desto stärker wird der Ursprung des Emissionsprofils in positive x - Richtung verschoben.

gedessen wird das Profil durch die Brechung leicht in Richtung des globalen Ursprungs verschoben. Ohne Brechung wäre der Ursprung des Emissionsprofils bei $x = r \cdot \sin\vartheta$, wobei r den Radius darstellt, bei den die Photonen detektiert werden und ϑ den Winkel angeben, um den die LED gedreht wird.

Je größer die Drehung ist, desto stärker wird die Rotationssymmetrie gebrochen. Wie

zuvor erwähnt, rückt durch die Brechung der Ursprung des Abstrahlprofils in Richtung Koordinatenursprung. In Abbildung 39 ist besonders für die großen Kippwinkel zu erkennen, wie der Ursprung des Emissionsprofils Richtung des Koordinatenursprungs rückt (da gilt $x = 3\,\mathrm{m} \cdot \sin 20^\circ = 1{,}026\,\mathrm{m}$ und in Abb. 39 der Ursprung des Emissionsprofils deutlich Abweichung von diesem Wert zeigt).
Abbildung 40 zeigt das Emissionsprofil für die $\varphi = 0^\circ$ - Ebene für die verschiedenen Drehungen der LED um ϑ. Die Kurven wurden mithilfe des „Rastern“, wie oben beschrieben, generiert. Da die LED in die $\varphi = 0^\circ$ - Ebene gekippt wurde, ist in dieser Darstellung der unmittelbare Einfluss der Drehung auf das Profil zu erkennen. In der oberen Abbildung wurden die Kurven für eine klarerer Übersicht entzerrt dargestellt, was bedeutet, dass ein konstanter Wert zu der Anzahl addiert wurde. Der Übersichtlichkeithalber wurden die Kurven in zwei unterschiedlichen Plots dargestellt. Dadurch, dass die LED durch ihre Drehung um die y - Achse von der $\vartheta = 0^\circ$ - Richtung abweicht und um ϑ gedreht wird, rückt das zentrale Minimum des Abstrahlprofils um die LED - Achse herum zum Vorschein. Für eine Drehung um $\vartheta = 20^\circ$ ist sogar der plötzliche Abfall der Intensität auf beiden Seiten zu erkennen.
Für verschiedene φ - Richtungen sind auch verschiedene Verteilungen zu erwarten.
Wie in Abschnitt 6.2 dargestellt, wird die LED durch die Haltestruktur begrenzt und lässt sich theoretisch nur um $\approx 5^\circ$ kippen, abhängig je nach der Größe H. Um die Effekte deutlich zu machen, wurden auch die Fälle einer deutlich stärkeren Verkippung dargestellt.
Die in Abschnitt 6.2 angeführten Bedingungen an die LED werden für den Fall einer verkippten LED nicht untersucht. Bei einer verkippten LED ist es insbesondere sinnvoll, das Emissionsprofil abhängig von φ zu betrachten, da die Rotationssymmetrie des Emissionsprofils bei einer Drehung gebrochen wird. Abbildung 40 zeigt daher das Emissionsprofil nur für eine bestimmte φ - Richtung.

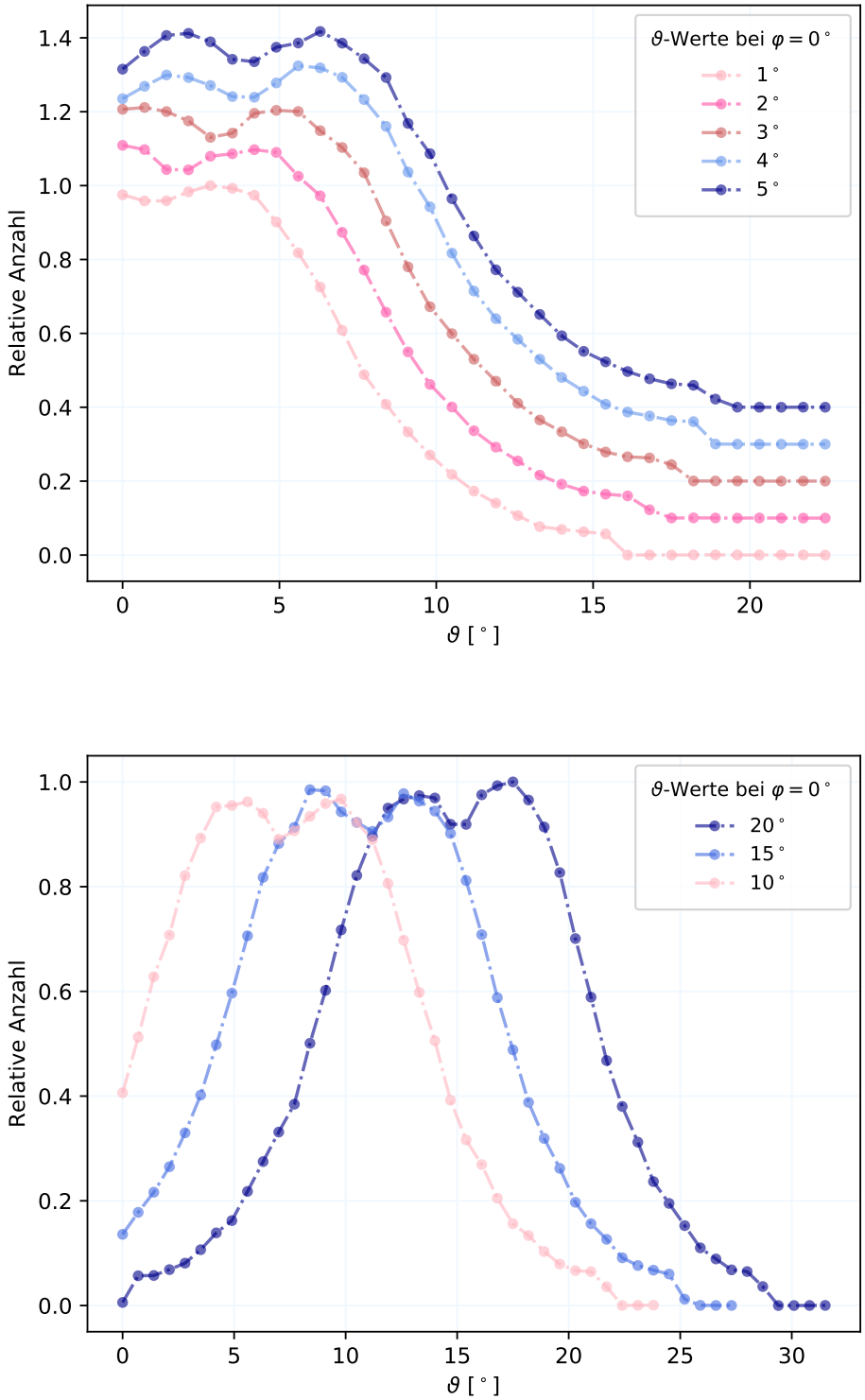


Abbildung 40: Emissionsprofil für verschiedene Kippwinkel ϑ erhalten durch die „Raster - Methode“ in der $\varphi = 0°$ - Ebene. In der oberen Abbildung wurden die Kurven der Übersichtlichkeit halber entzerrt dargestellt. Je größer der Kippwinkel, desto stärker rückt das lokale Minimum des Abstrahlprofils der LED zum Vorschein.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung des Emissionsprofils der LEDs in IceCube Upgrade auf der Basis der Simulationssoftware Geant4. Dafür war es notwendig, die LEDs und ihre Abstrahlcharakteristik in Geant4 zu implementieren. Die Daten der Abstrahlcharakteristik standen zur Verfügung und mussten an die Simulation angepasst werden. Ein Verfahren wurde vorgestellt, mit dem jedes beliebige Emissionsprofil zukünftig in die Simulation implementiert werden kann, wenn es in einer konstanten φ - Ebene gemessen wurde. Das bestehende mDOM-Modell wurde erweitert und diverse Studien zum Emissionsprofil einer implementierten LED gemacht.
Dadurch, dass das Emissionsprofil der LED für eine konstante φ - Ebene gemessen wurde, musste das Profil für die Implementierung in Geant4 entsprechend gewichtet werden, um es in der Simulation isotrop strahlen zu lassen. Bei der Implementierung musste zudem beachtet werden, dass die Photonen am LED - Körper gebrochen werden, so dass eine Transformation der Winkel notwendig war. Dieses Verfahren diente dazu, die Daten des Emissionsprofils adäquat in die Simulation einzusetzen, um exakt das Profil zu erhalten, welches im Experiment gemessen wurde. Dieses Verfahren kann genutzt werden, um andere gemessene Emissionsprofile in die Simulation zu implementieren, um Studien durchzuführen. In dieser Arbeit wurde eine gute Anpassung realisiert und mit diesem optimierten Emissionsprofil gearbeitet.
Die Studien beziehen sich alle darauf, dass eine LED in das Modul eingesetzt wurde. Durch die Grenzflächen des mDOMs, welche die Photonen passieren, verändert sich das Emissionsprofil. Neben den Brechungen der Photonen an den Grenzflächen wirken sich auch die Toleranzen der LED sowie des Moduls auf das Profil aus. Durch die Installation der LED in das Modul, verringert sich der Öffnungswinkel des Emissionsprofils, vorausgesetzt das Modul ist von Eis ohne Streuung und Absorption umgeben. Durch die Einstellung von Eis mit diesen optischen Eigenschaften wird das Profil stärker aufgeweitet, je größer die Laufstrecken der Photonen ist. Um jedoch Aussagen über den Einfluss des Moduls auf das Emissionsprofil zu erhalten, wurden die meisten Studien in dieser Arbeit mit einer mDOM Umgebung von Eis ohne jegliche Streuung und Absorption durchgeführt. Mit dem aus der Simulation erhaltenen Profil lassen sich in der Zukunft die Eiseigenschaften untersuchen, indem die Daten mit Monte-Carlo Simulationen verglichen werden.
Die Untersuchung der Änderung des Profils mit dem Abstand zeigte, dass sich das Emissionsprofil nach nur geringen Abständen zur mDOM Oberfläche nicht mehr ändert. Insbesondere mit Blick auf den in IceCube geringsten Abstand zum nächsten Modul von 3 m ändert sich das Profil nicht mehr. Dass sich das Profil mit dem Abstand ändert, ist auf die Brechung der Photonen zurückzuführen, welche die scheinbaren Emissionspunkte der Photonen beeinflusst.
Bei der Fertigstellung der mDOMs könnte es dazu kommen, dass optisches Gel in das Loch zwischen die LED und das darüberliegende Glasfenster gelangt. In der Stu-

die ist der Fall betrachtet worden, dass das gesamte Loch, in dem sich normalerweise Luft befindet, mit Gel gefüllt ist. Dies hat den Einfluss, dass das Emissionsprofil stark aufgeweitet wird, aufgrund der Brechung am Gel. Der Einfluss würde in der Realität allerdings in abgeschwächter Form auftreten, da nicht das gesamte Loch mit Gel gefüllt wäre, sondern bestenfalls wenige Tropfen hineingeraten würden.
Um zu große Auswirkungen durch den Einfluss bestimmter Toleranzen zu verhindern, sind diverse Anforderungen an die LED gestellt. Die in dieser Arbeit überprüften Anforderungen erfüllen diese größtenteils im Rahmen ihrer Interpretation. Die Ergebnisse zeigen, dass die Toleranz der Platzierung der LED in dem vorkommenden Ausmaß keinen Einfluss auf das Profil hat.
Der Einfluss auf das Emissionsprofil einer verkippten LED im mDOM wurde untersucht, jedoch nicht auf die Anforderungen geprüft, da hierzu eine konkrete Fragestellung vonnöten ist. Durch die schräge Abstrahlung der Photonen, wird die Rotationssymmetrie des Emissionsprofils gebrochen und je nach Fragestellung muss die Verteilung der Photonen in verschiedenen φ - Richtungen betrachtet werden, um äquivalente Aussagen zu den gestellten Bedingungen zu tätigen.
Im Rahmen dieser Arbeit wurde zudem der Einfluss einer Luftblase auf die Sensitivität des Moduls geprüft. Diese Untersuchungen basieren ebenfalls auf Geant4. Durch Lufteinschlüsse im optischen Gel, welche sich durch den im Modul herrschenden Unterdruck ausdehnen können, tritt eine nicht kontrollierbare Streuung von auftreffenden Photonen auf. Durch Simulationen des Moduls mit und ohne Luftblase, kann durch das Auswerten der effektiven Fläche eine Aussage über den Einfluss solch einer Luftblase getätigt werden. Die Betrachtung ist abhängig von Größe, Ausdehnung und Position der Luftblase. In dieser Arbeit wurde eine verhältnismäßig große Luftblase im Vordergrund eines Reflektors direkt auf dem Glas der Photokathode des PMTs simuliert und untersucht. Das mDOM-Modell wurde mit nur einem PMT gewählt. Trotz dessen ist der Einfluss mit $L = (1{,}82 \pm 0{,}02)\,\%$ sehr gering. L gibt an, dass die effektive Fläche eines einzigen PMTs um $1{,}82\,\%$ reduziert wird.

Mit Blick auf die Zukunft ist es wichtig, das Profil mehrerer LEDs im Experiment zu messen, um eine höhere Statistik zu erlangen. Dazu könnte der Aufbau optimiert werden, indem beispielsweise der Abstand der LED zur Photodiode vergrößert wird, oder eine kleinere Photodiode verwendet wird. Das hätte den Vorteil, das Emissionsprofil einfacher in die Simulation zu integrieren, da in hinreichend großer Entfernung der Photodiode zur LED, die Photodiode keine Ausdehnung mehr hätte. Das würde die Genauigkeit bei der Gewichtung des Profils verbessern.
Des Weiteren könnte das Emissionsprofil einer LED im mDOM in Luft getestet werden und die Ergebnisse mit der Simulation verglichen werden. So würde das Vertrauen in die Simulation gefestigt werden.

Literatur

[1] Takaaki Kajita, *Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations*. URL https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/kajita-lecture.pdf.

[2] J. und L. Oberauer, *Neutrinophysik*, Springer-Verlag 2019.

[3] M. G. Aartsen et al., *The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems*. URL https://arxiv.org/pdf/1612.05093.pdf.

[4] University of Wisconsin-Madison, *IceCube South Pole Neutrino Observatory: IceCube Detectoe*.Stand: 21.08.2016, URL https://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector.

[5] IceCube-Gen2 Collaberation, *IceCube-Gen2: The Window to the Extreme Universe*. URL https://arxiv.org/pdf/2008.04323.pdf

[6] Aya Ishihara, *The IceCube Upgrade - Design and Science Goals*. URL https://arxiv.org/pdf/1908.09441.pdf.

[7] Christian Spiering, *Towards High-Energy Neutrino Astronomy*. URL https://arxiv.org/pdf/1207.4952.pdf.

[8] H. Kolanoski und N. Wermes, *Teilchendetektoren*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

[9] Martin Antonio Unland Elorrieta, *Studies on dark rates induced by radioactive decays of the multi-PMT digital optical module for future IceCube extensions*. Masterarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2017.

[10] E. Andres et al., *The AMANDA Neutrino Telescope: Principle of Operation and First Results*. URL https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9906203.pdf.

[11] M. G. Aartsen et al., (IceCube), Nucl. Instrum. Meth. **A711**, 73 (2013), arXiv:1301.5361 [astro-ph.IM].

[12] IceCube Collaberation, *Gallery*. URL https://gallery.icecube.wisc.edu/internal/main.php.

[13] Francis Halzen, Spencer R. Klein, *IceCube: An Instrument for Neutrino Astronomy*. URL https://arxiv.org/pdf/1007.1247.pdf.

[14] R. Abbasi et al., *The IceCube high-energy starting event sample: Description and flux characterization with 7.5 years of data*. URL https://arxiv.org/pdf/2011.03545.pdf.

[15] Jia-Wei Luo und Bing Zhang, *Blazar – IceCube neutrino association revisited*. URL https://arxiv.org/pdf/2004.09686.pdf.

[16] SILVIA BRAVO, *IceCube Upgrade for precision neutrino physics and astrophysics kicks off*, 2018. URL `https://icecube.wisc.edu/news/view/605`.

[17] T. ANDERSON ET AL., *TDesign and performance of the multi-PMT optical module for IceCube Upgrade*. URL `https://doi.org/10.22323/1.395.1070`.

[18] M. KELLERMANN, *Entwicklung akustischer Sensoren für ein Kalibrierungssystem für die Geometrie des IceCube Upgrades*, Masterarbeit, RWTH Aachen

[19] NIKHITA KHERA, FELIX HENNINGSEN, *POCAM in the IceCube Upgrade*. URL `https://arxiv.org/pdf/2108.05298.pdf`.

[20] ISHIHARA, A.: Status of IceCube-Gen2 Phase1 (aka IceCube Upgrade). In: *Exploration of Particle Physics and Cosmology with Neutrinos Workshop 2019*, 2019

[21] HEINEN, D.; ET AL.: An Acoustic Calibration System for the IceCube Upgrade. In: *Proceedings of the 36th International Cosmic Ray Conference*. Madison, WI, USA, 2019

[22] CHRISTOPH TÖNNIS ET AL, *Deployment of the IceCube Upgrade Camera System in the SPICEcore hole*. URL `https://arxiv.org/pdf/2107.10786.pdf`.

[23] Private Übermittlung innerhalb der IceCube Gruppe Münster.

[24] JUAN BAUTISTA BERNAL FLORINDO, *Simulation studies towards an orientation calibration technique for the multi-PMT digital optical module in future IceCube extensions*. Masterarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2018.

[25] M. ACKERMANN ET AL., J. Geophys. Res. 111 (2006) D13203

[26] CRISTIAN JESUS LOZANO MARISCAL, *Studies on the sensitivity of multi-PMT optical modules to supernova neutrinos in the South Pole ice*. Masterarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2017.

[27] LEW CLASSEN, *The mDOM – a multi-PMT digital optical module for the IceCubeGen2 neutrino telescope*. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.

[28] BJÖRN HEROLD, *Simulation and measurement of optical background in the deep sea using a multi-PMT optical module*. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.

[29] S. AGOSTINELLI, ET AL., *Geant4 - a simulation toolkit* Nucl. Inst. Meth. A 506 (3) (2003) 250 – 303.

[30] VEDANT BASU ET AL, *A next-generation optical sensor for IceCube-Gen2*. URL `https://pos.sissa.it/395/1062/pdf`.

[31] Geant4 Collaboration, *Geant4 user's guide for application developers*. URL https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html.

[32] Brechungsindex Silikonharz. URL https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-019-07015-x.

A Anhang

Im Folgenden sind die Originalformulierungen für die Bedingungen an die LEDs angegeben:
Each LED axis shall point to within 5 degrees (limit, not RMS) space angle of its nominal (design) direction. Around each LED pointing direction, the light distribution should be approximately of a bell shape (similar to a Gaussian) in each degree of freedom. A small dip near the LED axis is acceptable as long as it's no more than 20% strong and less than 5 degrees wide (as measured from LED axis to the maximum). The standard deviation (width) should not exceed 15 degrees. Emission at large angles shall be small (less than 10% beyond 2 sigma).