



Bachelorarbeit

aus der Physik

Charakterisierung der Kalibrations LEDs für das IceCube Upgrade

Kilian Schunter

Betreuer: Dr. Martin Rongen

Erlangen Centre for Astroparticle Physics

Abgabedatum: 31.03.2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	IceCube Neutrino Detektor	7
2.1	Detektion von Neutrinos	7
2.2	Tracks und Cascades	7
2.3	IceCube Detektoraufbau	9
2.4	IceCube Upgrade	10
3	Vermessung und die optischen Eigenschaften des Eises	15
4	Intensitätskalibration D-Egg und mDOM Flasher	19
4.1	Bisherige Teststände und Messergebnisse	19
4.2	Neuer Teststand	20
4.3	Versuchsdurchführung	21
4.4	Integrationsflächen	22
4.5	Akzeptanztests der Bilder	25
4.6	Ablauf der Auswertung	27
4.7	Ergebnis	28
5	Temperaturabhängigkeit der LEDs	31
5.1	Versuchsaufbau	32
5.2	Intensitätsmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen	33
6	Zusammenfassung	37

1 Einleitung

Der Nachthimmel war schon immer eine Quelle des Staunens und der Geheimnisse für die Menschen. Zu Beginn wurde er nur mittels des optischen Spektralbereichs beobachtet [7]. Dieses befindet sich in einem Wellenlängenbereich von 400 nm bis 750 nm (vgl. [Abbildung 1.1](#)) [9].

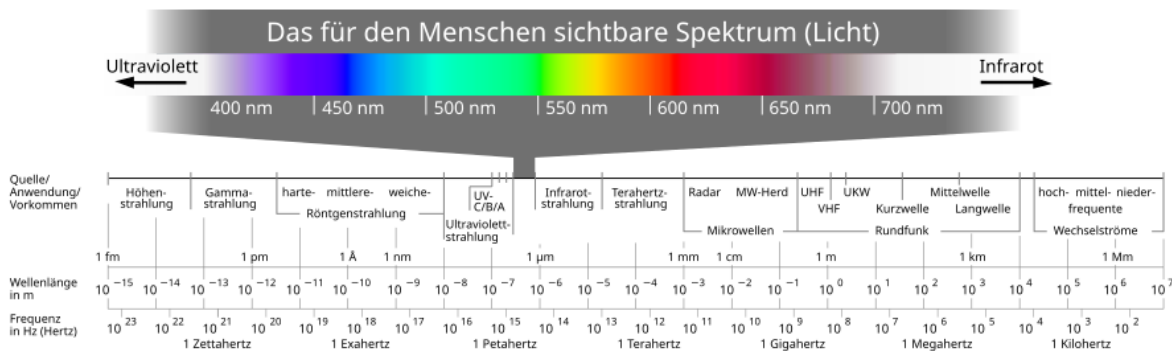


Abbildung 1.1: Das elektromagnetische Spektrum [4]

Die Beobachtung des optischen Spektralbereichs nennt sich Astronomie [7]. Erst mit der Verbesserung der Messtechnik spezialisierte sich die Astronomie zur Astrophysik [7]. In der Astroteilchenphysik ergänzt man bereits gewonnene Informationen aus der Astrophysik mit Elementarteilchen kosmischer Herkunft [7]. Die Geburtstunde der Astroteilchenphysik war im Jahre 1912 mit der Ballonfahrt von Victor Hess [7]. Während dieser entdeckte Victor Hess, durch eine Ionisationskammer, die kosmische Strahlung [7]. Das Davis-Experiment im Jahre 1967, bei welchem solare Neutrinos gemessen wurden, ermöglichte es, die Sonne über die Neutrinos zu beobachten [7]. Im Jahre 1987 konnte durch das Kamioka Nucleon Decay Experiment (KamiokaNDE) sogar, durch Ausnutzen von Richtungsinformationen der Neutrinos, die Sonne in Echtzeit gesehen werden [7]. Ebenfalls im Jahre 1987 konnte das KamiokaNDE, durch den Wasser-Cherenkov-Detektor und das Irvine Michigan Brookhaven Collaboration Neutronen einer Supernova, aus der Großen Magellan'schen Wolke, registrieren [7].

Neutrinos gehören im Standardmodell der Teilchenphysik zur Familie der Fermionen, denn Neutrinos besitzen einen halbzahligen Spin. Die Familie der Fermionen teilt sich auf in Baryonen und Leptonen. Im Gegensatz zu Elektronen, Myonen und Tau-Lepton

1 Einleitung

besitzen alle drei Neutrino-Typen (Elektron-Neutrino ν_e , Myon-Neutrino ν_μ , Tau-Neutrino ν_τ) keine Ladung [5]. Dies ermöglicht es den Neutrinos große Strecken im Universum zurückzulegen ohne von unregelmäßigen interstellaren und intergalaktischen Magnetfeldern abgelenkt zu werden [7]. Neutrinos wechselwirken durch die schwache Wechselwirkung. Reaktionen von Neutrinos finden daher nur selten statt z.B. kann ein Neutrinostrahl durch die komplette Erde hindurch gehen, wenn auch mit einer gewissen Abschwächung [15]. Die geringen Wechselwirkungen und das nicht interagieren mit Magnetfeldern macht das Neutrino zu einem guten Kandidaten für die Multimessenger-Astronomie.

Um Neutrinos zu detektieren benötigt es große Volumina an dielektrischen Interaktionsmaterial [2]. Natürliche Materialien wie Wasser in Meeren oder Eis an den Polen als Interaktionsmaterial sind daher naheliegend [2]. Da Unterwasserprojekte wie Baikal-Teleskop, DUMAND und NESTOR funktionieren, aber mit technischen Schwierigkeiten zu kämpfen hatten und den Wasserbewegungen ausgeliefert sind und AMANDA bereits als Detektor im Eis funktionierte, entschied man sich bei IceCube erneut für einen Detektor im Eis [7]. Dieser wurde dann auch im Jahre 2011 fertiggestellt [13]. Das IceCube Upgrade, welches für 2025/26 geplant ist, ist die erste Erweiterung des IceCube Detektors [2]. Das Upgrade beinhaltet über 700 zusätzliche Module an sieben Kabeln [13]. In den Modulen sind LED-Flasher verbaut welche zum Vermessen der optischen Eigenschaften des Eises dienen [2, 3, 10]. Auf der Charakterisierung der LEDs im Bezug auf der Temperaturabhängigkeit und der Flächenintensität pro Abstand liegt der Fokus dieser Arbeit.

2 IceCube Neutrino Detektor

In diesem Kapitel wird sich zuerst mit der Detektion von Neutrinos beschäftigt, bevor auf die Typen von rekonstruierten Messergebnissen eingegangen wird. Im Anschluss wird der Aufbau des IceCube Detektors und das geplante Upgrade beschrieben.

2.1 Detektion von Neutrinos

Dieses Unterkapitel ist mithilfe der Quelle [2] erstellt. Um Neutrinos zu detektieren, nutzt IceCube aus, dass geladene Teilchen, die durch Neutrino-Interaktionen entstehen, sich schneller durch das Eis bewegen als die Phasengeschwindigkeit des Lichts im Eis und Cherenkov-Photonen emittieren. Diese Interaktionen von Neutrinos sind in [Abschnitt 2.2](#) zu finden.

Aufgrund der Cherenkov-Photonen ist es erst möglich, Neutrino-Interaktionen zu rekonstruieren. Aufgrund des kleinen Wirkungsquerschnitts der Neutrinos und der extrem niedrigen Flüsse, die von astrophysikalischen Objekten auf der Erde erwartet werden, ist es nötig ein enormes Detektorvolumen zur Verfügung zu haben. Die Eiskappe am Südpol ist etwa drei Kilometer dick und ein geeigneter Betriebsstandort, da sie nicht nur eine große Menge an Interaktionsmaterial, sondern auch ein Medium mit ausgezeichneten optischen Eigenschaften bietet.

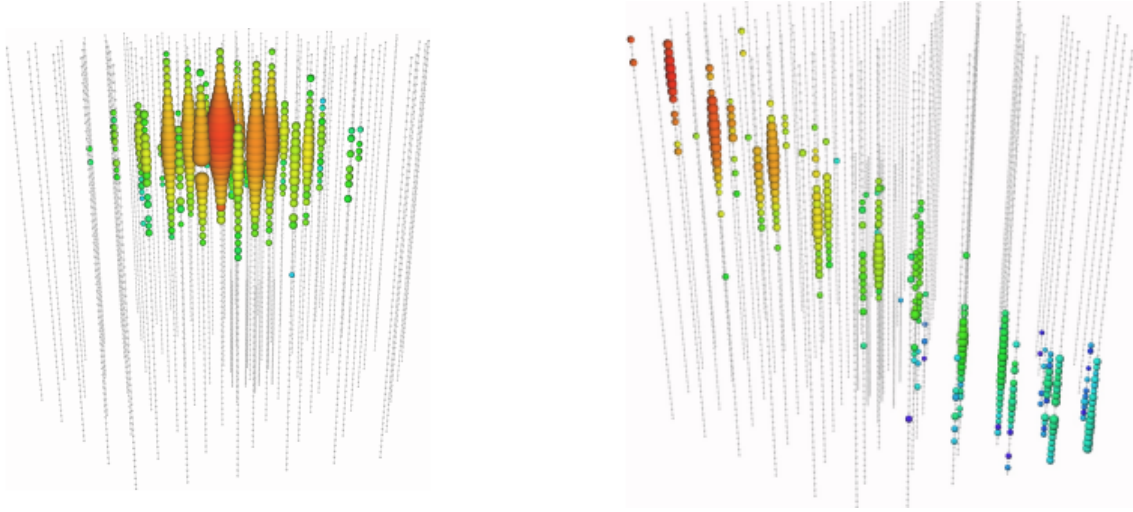
Zur Untersuchung der Energie und der Richtung des Partikels, ist das Verständnis der optischen Eigenschaften des Eises unumgänglich. Dazu mehr in [Kapitel 3](#). Im Allgemeinen wird die Richtung aus den gemessenen Photonen und den Ankunftszeiten in den verschiedenen optischen Sensoren abgeleitet.

2.2 Tracks und Cascades

In diesem Unterkapitel geht es um die zwei großen unterschiedlichen rekonstruierbaren Messergebnisse (Events) die im IceCube Detektor ablaufen können, bzw. simuliert werden können, welche durch drei verschiedene Interaktionen entstehen. Dieses Unterkapitel ist mit Quelle [19] erstellt.

In [Abbildung 2.1](#) sind beide aufgeführt. Die grauen Kugeln in [Abbildung 2.1](#) stellen die optischen Sensoren dar, die wiederum an Kabeln hängen. Die Farben in beiden Eventabbildungen geben den zeitlichen Verlauf der registrierten Photonen an. D.h. die roten Kugeln wurden zuerst detektiert und die blauen zuletzt. Des Weiteren gibt die

2 IceCube Neutrino Detektor



(a) Simulation eines Cascade Events in IceCube [19]

(b) Simulation eines Track Events in IceCube [19]

Abbildung 2.1: Simulationen der unterschiedlichen Ereignisse in IceCube

Größe der farbigen Kugel an, wie viele Photonen registriert wurden.

Abbildung 2.1a repräsentiert hadronische oder elektromagnetische Kaskaden, welche durch Elektronen entstehen, die wiederum in einer ν_e -CC-Wechselwirkung erzeugt wurden. CC ist die Abkürzung für "charged current". Als CC-Wechselwirkungen werden Teilcheninteraktionen bezeichnet bei welchen das Austauschteilchen eine elektrische Ladung besitzt. Bei "neutral current" (NC-) Wechselwirkungen besitzt das Austauschteilchen keine elektrische Ladung. Charakteristisch für Cascade Events ist die punkthafte Quelle und die kugelförmige Signatur im Detektor.

In Abbildung 2.1b sieht man das Track-Event, das der Detektor aufzeichnet, wenn ein Myon durch diesen fliegt. Myonen die aus ν_μ -CC-Wechselwirkungen entstehen, können viele Kilometer im Eis zurücklegen. Die Detektorsignatur ist eine Bahn von Licht, die die Myonenbahn umgibt. Sollten Myonen im Detektor starten, enthält die Signatur zusätzlich Kaskadenbeiträge.

In einer CC ν_τ -Wechselwirkung kann es eine Überlagerung von einem Track und zwei Kaskaden-Events geben. Durch die CC-Wechselwirkung entsteht eine hadronische Kaskade und ein Tau-Lepton, welches sich kurz entlang einer Bahn ausbreitet und danach in eine Kaskade zerfällt. Dies ist im Detektor allerdings nur unter bestimmten Umständen sichtbar. Andernfalls lässt sich dieses Event nicht von einem NC- oder ν_e -CC-Signatur unterscheiden.

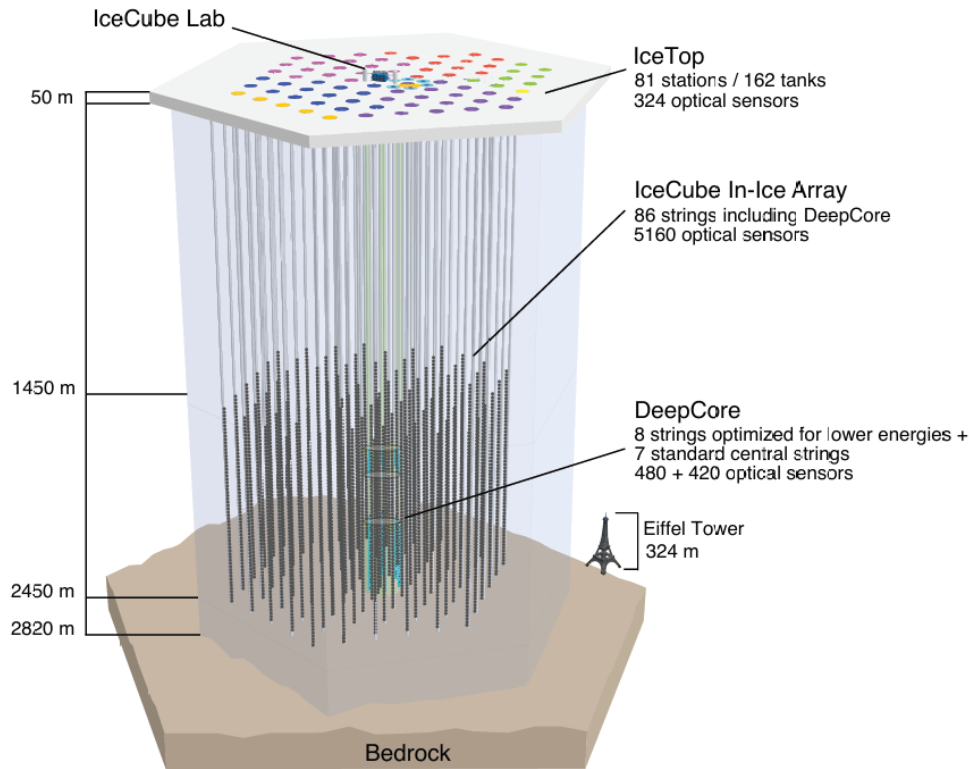


Abbildung 2.2: Aufbau des IceCube Detektors [1]

2.3 IceCube Detektoraufbau

In [Abbildung 2.2](#) ist der Detektoraufbau von IceCube dargestellt. Jedes der 86 Kabel wurde in ein vorher aufgeschmolzenes Loch heruntergelassen [20]. Mit der verwendeten Schmelztechnik konnten innerhalb von 40 Stunden ein Loch mit 60 Zentimeter Durchmesser bis in zweieinhalb Kilometer Tiefe aufgeschmolzen werden [12]. Insgesamt wurden 86 Kabel mit 5160 optischen Sensoren (DOMs) im Eis verbaut [2].

Der Aufbau eines DOM ist in [Abbildung 2.3](#) zu sehen. Innerhalb eines DOMs ist ein 10" photomultiplier tube (PMT) und 12 LEDs verbaut [2]. Die PMTs können Wellenlängen von rund 300 bis 600 Nanometer wahrnehmen [2]. Die PMTs haben eine zeitliche Auflösung von zwei bis drei Nanosekunden und speichern wann die Photonen detektiert wurden [2]. Diese Eigenschaft ermöglicht es die Quelle der Photonen auf einen Meter genau im Eis zu rekonstruieren [2].

Die zwölf LEDs können bekannte Lichtimpulse ins Eis senden [2]. Diese werden von den anderen DOMs aufgefangen und zur Vermessung der optischen Eigenschaften des Eises verwendet [2]. Dies wird in [Kapitel 3](#) vertieft erklärt. Die DOMs sind erst ab einer Tiefe von ca. 1.5 km unterhalb der Eisoberfläche angebracht und reichen bis auf ca. 2.5 km [2].

2 IceCube Neutrino Detektor

Der Grund dafür ist, dass erst ab einer Tiefe von 1.5 km die Luftblasen in das Eis in die kristalline Struktur des Eises eingebettet werden [2]. Das instrumentalisierte Volumen beträgt 1 km^3 [2].

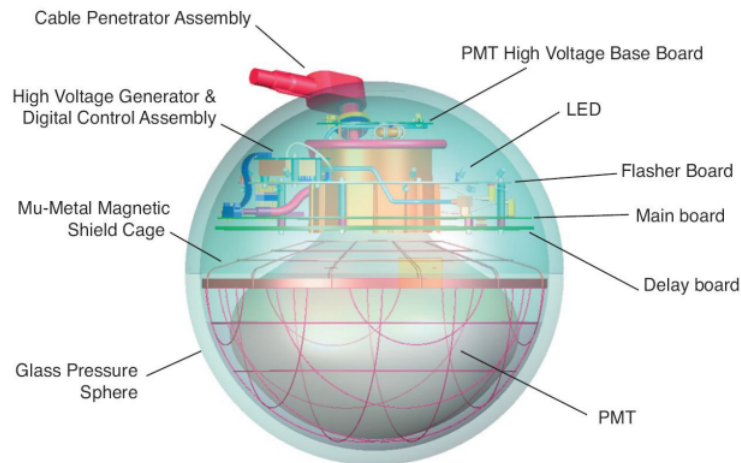


Abbildung 2.3: Aufbau eines DOM skizziert mit allen wichtigeren Komponenten [19]

2.4 IceCube Upgrade

Wie in [Abbildung 2.4](#) zu sehen ist, werden für das IceCube Upgrade sieben neue Kabel in das Eis eingebaut [13]. Dies soll bereits im Jahr 2025/26 passieren [2]. Die Kabel werden im Zentrum des IceCube-Detektors verlegt [13]. Die neuen Kabel werden mit ca. 700 optischen Modulen ausgestattet sein [13]. Unter diesen optischen Modulen sind das Multi-PMT Digital Optical Modul (mDOM) (vgl. [Abbildung 2.6](#)) und das Digital-Egg (D-Egg) (vgl. [Abbildung 2.5](#)). Man erhofft sich dadurch, das Wissen über die optischen Eigenschaften des Eises zu verbessern [13]. Denn das Eis ist die größte Quelle für systematische Unsicherheiten [13]. Die verbesserten Daten sollen auch für die bereits über die letzten zehn Jahren gesammelten Daten verwendet werden [13].

Das D-Egg besitzt im Vergleich zu den bisher verbauten DOMs (vgl. [Abbildung 2.3](#)) nicht einen 10" PMT, sondern zwei 8" PMTs [12]. Die Form und das Material des Druckbehälters wurden sorgfältig entworfen, denn aufgrund der Eiform konnte 10% des Durchmessers eingespart werden, was zu einer Treibstoffverbrauch Einsparung von 20% für die Bohrung führt [12].

Der mDOM (vgl. [Abbildung 2.6](#)) wurde inspiriert von einem optischen Modul, dass zuerst im Nevod-Detektor verwendet wurde und über das KM3NeT-Projekt zur Neutrino Astronomie kam [12]. Der mDOM verfügt über 24 3" PMTs die einzeln ausgelesen

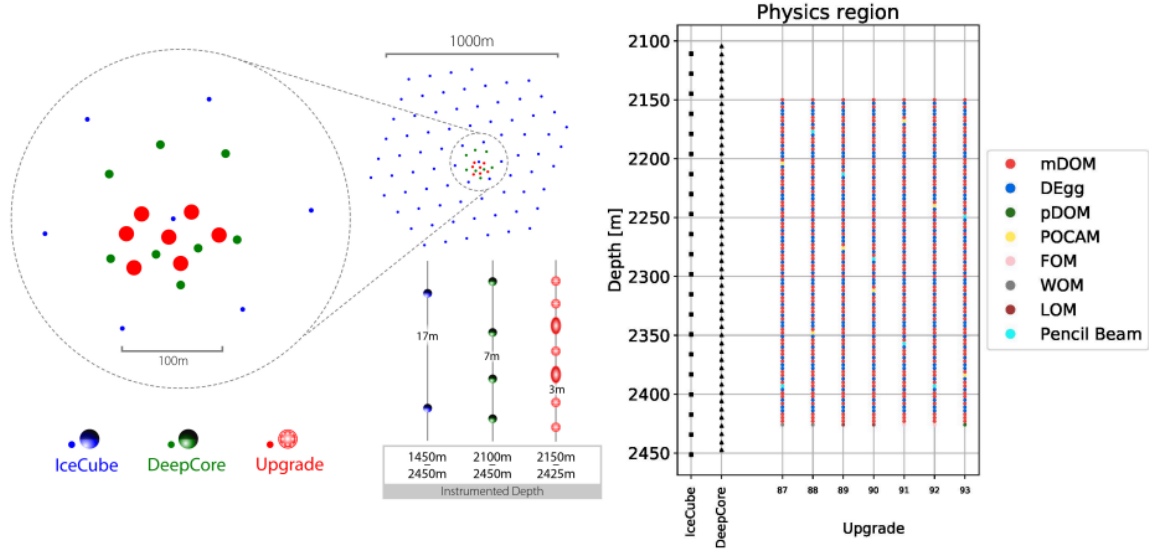


Abbildung 2.4: Darstellungen der neue verlegten Kabel und der Anordnung der Detektoren [13]

werden können [12, 11]. Dies erhöht trotz der kleineren PMTs die effektive Fläche im Vergleich zum DOM [12]. Durch die Anordnung der PMTs wird eine verbesserte Winkelauflösung erreicht [12].

Sowohl das D-Egg als auch der mDOM besitzen, wie der Vorgänger DOM, Flasher-LEDs zum Vermessen der optischen Eigenschaften des Eises [2, 10, 3]. In [Abbildung 2.7](#) sind sowohl die verwendeten LEDs (Roithner XRL-400-50 LED), welche Photonen mit einer Wellenlänge von 405 ± 10 Nanometern abstrahlen, wie auch ein Foto eines zusammengebauten mDOMs zu sehen, bei welchem ein Sitz der LEDs hervorgehoben wurde [2, 11]. Zudem wurden die LEDs beider Systeme nach denselben Spezifikationen und mit äquivalenten Tests geprüft [11]. Aufgrund der Schwankungen der Leistung der LEDs und des Pulstreibers unterscheiden sich die abgestrahlte Intensität bei vorgegebener Spannung für jede LED [11]. Daher müssen verschiedene LEDs bei unterschiedlichen Vorspannungen betrieben werden, um die gleiche Zielintensität von 10^9 Photonen pro Puls zu erreichen [11]. Der Fokus dieser Bachelorarbeit liegt auf der Untersuchung der LED, dies wird in [Kapitel 4](#) und [Kapitel 5](#) geschehen.

2 IceCube Neutrino Detektor

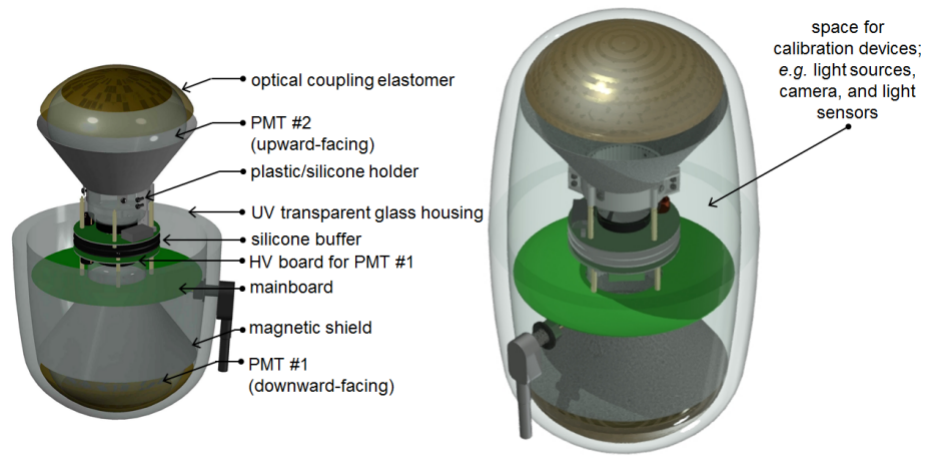


Abbildung 2.5: Aufbau des D-Eggs [12]

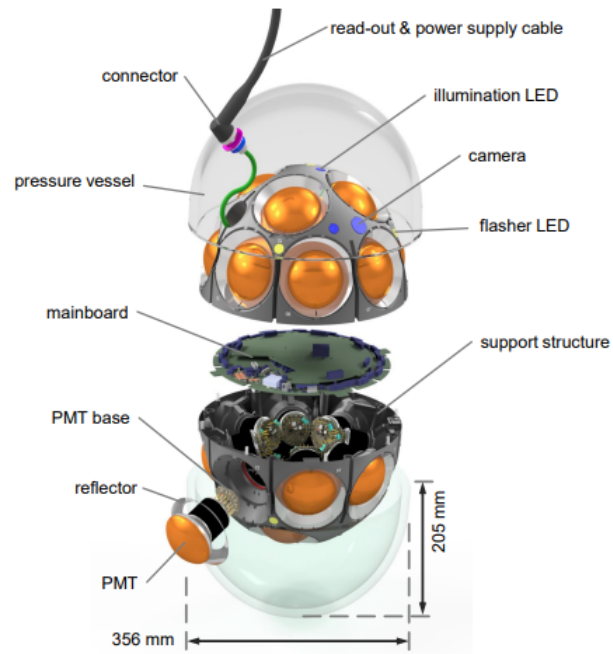


Abbildung 2.6: Explosionszeichnung des mDOMs [3]

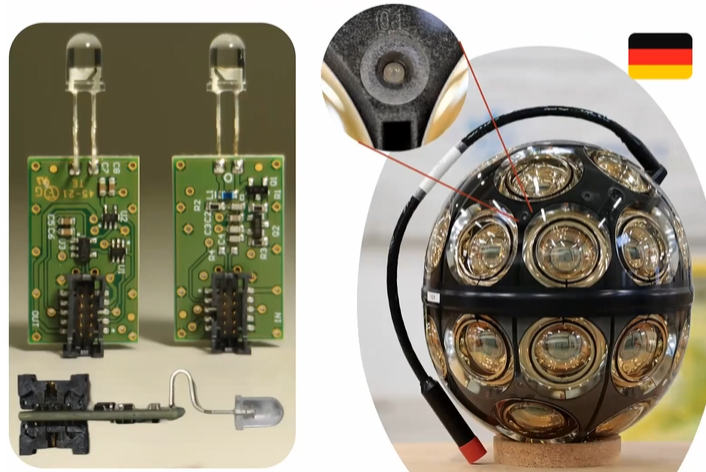


Abbildung 2.7: Foto der verwendeten LED und es mDOM [11]

3 Vermessung und die optischen Eigenschaften des Eises

Da der IceCube-Detektor komplett im Eis verbaut ist und Photonen, die durch das Eis hindurch propagieren, an den PMTs registriert werden, ist es nötig die optischen Eigenschaften des Eises zur Rekonstruktion des Photonenwegs zu kennen. Von den optischen Eigenschaften interessieren uns besonders die Absorption und die Streuung. Daher werden in diesem Kapitel ein Paar der Experimente aufgelistet, welche zum Verständnis des Eises beigetragen haben.

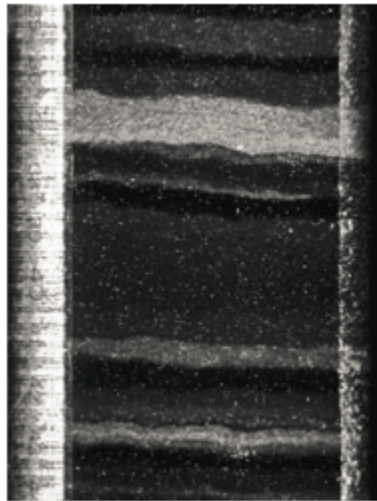


Abbildung 3.1: Eis Stratigraphie eines 10 cm langen Bohrkerns in einer Tiefe von 1813 Meter [19]

In [Abbildung 3.1](#) ist ein Auszug aus einem Bohrkern zu sehen [19]. Dieser Auszug des Bohrkerns zeigt zehn Zentimeter des Eiskerns. [19]. Innerhalb des Kerns sind kleine Ablagerungen, die sogenannten Verunreinigungen, zu sehen [19]. Diese Verunreinigungen sind der Hauptgrund für Streuung im Eis [2]. Diese Verunreinigungen sind über das Herabfallen der Schneeflocken aus der Luft mit in das später daraus entstehende Eis gelangt.

[Abbildung 3.2](#) zeigt das Radarprofil des Eises [19]. Ganz unten in [Abbildung 3.2](#) ist das Grundgestein der Antarktis zu sehen [19]. Darüber die Eisschichten, die sich (von

3 Vermessung und die optischen Eigenschaften des Eises

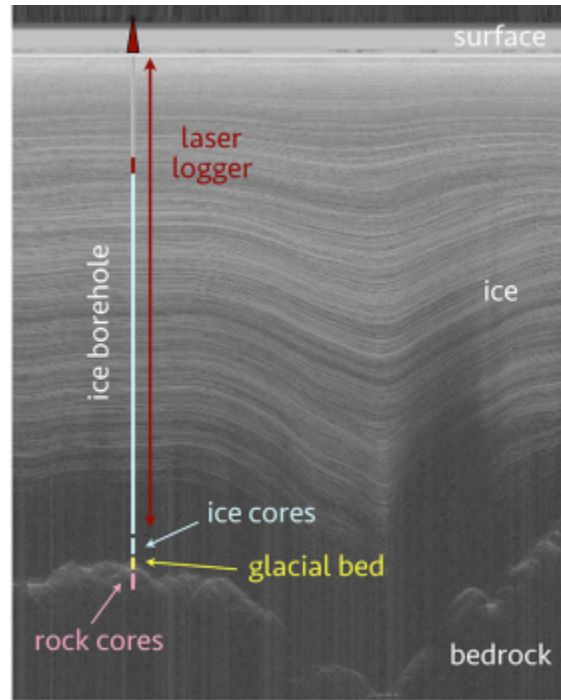


Abbildung 3.2: Radarprofil des Eises am Südpol [19]

unten nach oben) zuerst am Grundgestein anpassen und dann in eine gerade Eisschicht übergehen [19]. Der Verlauf der Eisschichten wurde ebenfalls untersucht [19].

Der dust logger, bestehend aus einem Laser, zwei optischen Trennobjekten und einem PMT, wurde in einigen Bohrlöchern heruntergelassen [19]. Dabei strahlt ein Laser waagrecht ins Eis [19]. Durch Streuprozesse an Verunreinigungen im Eis gelangen abgelenkte Photonen des Laserstrahls zu dem, sich einen Meter unterhalb des Lasers befindenden, PMT [19]. Die optischen Trennobjekte verhindern lediglich, dass der Laserstrahl innerhalb des Bohrloches den PMT erreicht [19]. Dieser hat, in [Abbildung 3.3](#) zu sehen, die Verunreinigungen in jeder Höhe des Bohrlochs gemessen [19].

Die DOMs selbst konnten aufgrund der zwölf verbauten LEDs Licht aussenden und das Eis vermessen [2]. Es wurde sich in [Abbildung 3.4](#) angeschaut, wie viele Photonen, welche von einem DOM ausgesandt, von einem anderen registriert wurden.

Die beiden DOMs sind ca. 150 Meter entfernt [2]. Durch die Verunreinigungen werden die Photonen gestreut, dadurch wird der zurückgelegte Weg länger und die Ankunftszeit der ersten Photonen werden zu einem späteren Zeitpunkt detektiert [2]. Je mehr Streuprozesse zwischen dem Sender und Empfänger DOM stattfinden, desto später werden die ersten Photonen registriert. Die steigende Flanke ist im Allgemeinen empfindlich gegenüber dem Streukoeffizient [2]. Nach dem Hochpunkt des Graphen fällt dieser.

Das Gefälle bei großen Zeiten gibt Aufschluss darüber, wie groß der Absorptionsanteil

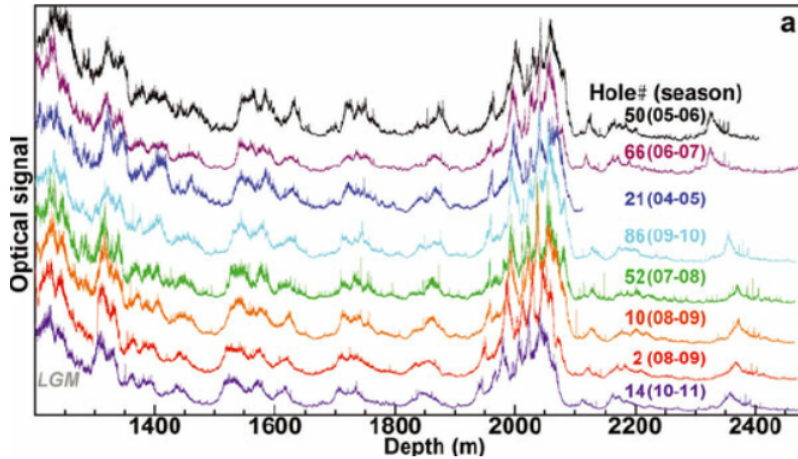


Abbildung 3.3: Gemessene optische Signal aus unterschiedlichen Bohrlöchern aufgetragen über die Tiefe [19]

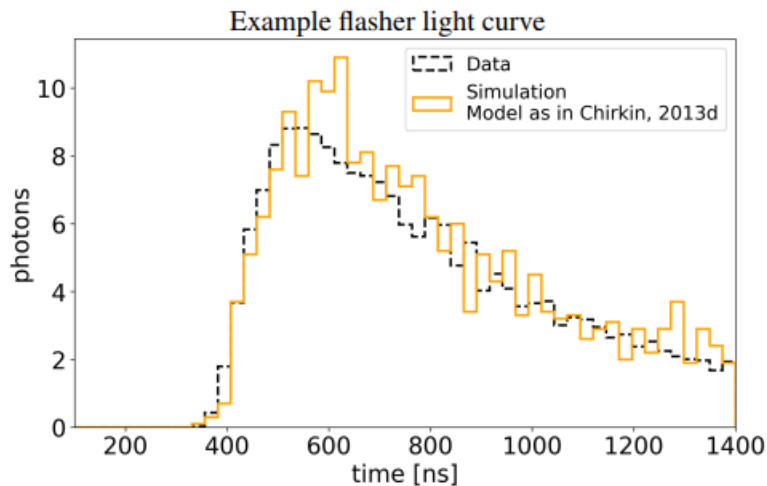


Abbildung 3.4: Vergleich der Simulationsdaten mit gemessenen Daten [2]

der Verunreinigungen ist [2]. Denn je schwächer der Graph abnimmt, desto mehr Photonen kommen auch noch bei größeren Zeiten an, umso weniger Photonen werden also absorbiert [2].

Während pures Eis, d.h. Eis ohne Luftblasen und Verunreinigungen, eine Absorptionlänge von über 1,5 Kilometern und keine Streuung besitzt, besitzt das Eis in der Detektortiefe eine Absorptionlänge von 400 Metern und eine effektive Streulänge von 100 Metern [2]. Dies sind charakteristische Werte und keine absoluten Werte für alle

3 Vermessung und die optischen Eigenschaften des Eises

Positionen im Eis [18]. Dies ergibt, dass Photonen durchschnittlich fünf Mal gestreut werden, bevor sie absorbiert werden. [Abbildung 3.5](#) zeigt eine Simulation eines Casca-

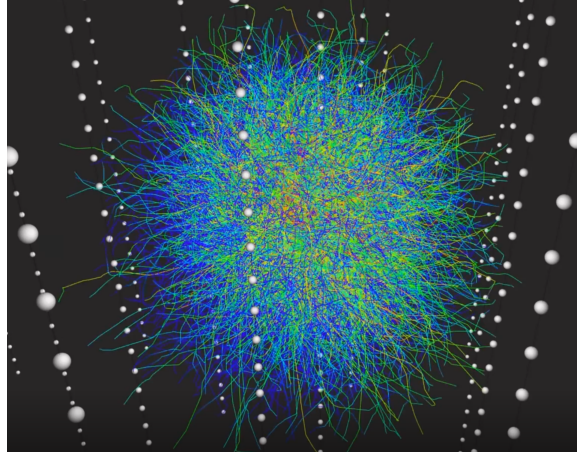


Abbildung 3.5: Streuung von Photonen in Eis [14]

4 Intensitätskalibration D-Egg und mDOM Flasher

Wie bereits in [Abschnitt 2.4](#) erwähnt, befinden sich sowohl im D-Egg als auch im mDOM Flasher-LEDs zur Vermessung der optischen Eigenschaften des Eises im Detektor [\[3, 10\]](#). Beide Systeme verfügen über dieselbe LED (Roithner XRL-400-50), denselben Pulstreiber und denselben Schaltplan [\[18\]](#). Dennoch wurden die LEDs in bisherigen Tests in verschiedenen Testständen untersucht [\[11\]](#). Im weiteren Verlauf des Kapitels werden diese Teststände beschrieben und das Ergebnis aus diesen Tests besprochen. Im Anschluss wird der neue Teststand besprochen und die Ergebnisse aus der neuen Messung dargestellt.

4.1 Bisherige Teststände und Messergebnisse

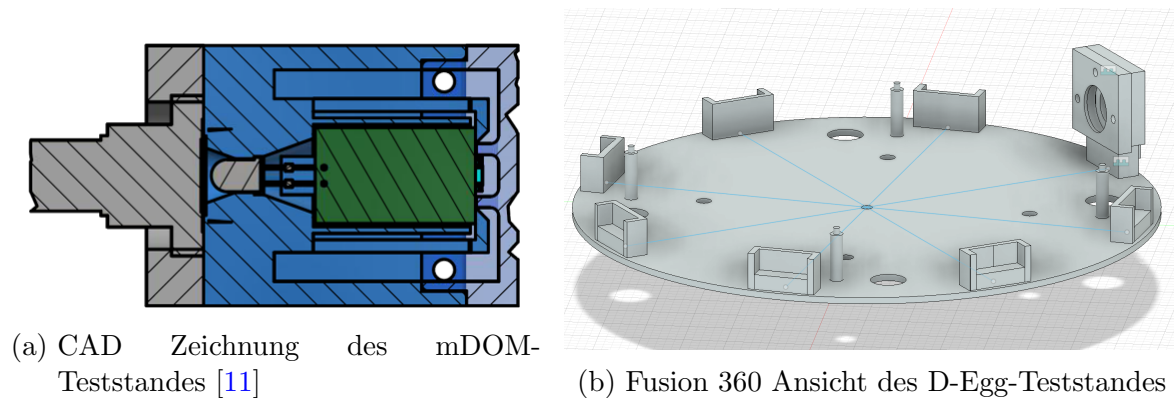


Abbildung 4.1: Die beiden bisherigen LED-Teststände

In [Abbildung 4.1](#) sind die bisherigen 3D-gedruckten LED-Teststände für die mDOM und D-Egg Produktion zu sehen. Beide Teststände haben für die Intensitätsmessungen der LEDs eine Photodiode (Hamamatsu S2281) verwendet [\[11\]](#). Die Photodiode ist im mDOM-Teststand (vgl. [Abbildung 4.1a](#)) auf der linken Seite, innerhalb der ebenfalls grauen Halterung zu sehen. Beim D-Egg-Teststand (vgl. [Abbildung 4.1b](#)) befinden sich die Photodioden, acht Stück, innerhalb der exemplarisch dargestellten Halterung auf der rechten Seite des Bildes. Der Abstand zwischen der Spitze der LED und dem

4 Intensitätskalibration D-Egg und mDOM Flasher

Gehäuse der Photodiode beträgt im mDOM-Teststand 1.3 ± 0.5 mm und für den D-Egg-Teststand 6.2 ± 0.5 mm. Diese Abstände sind händisch nachgemessen worden.

In [Abbildung 4.2](#) ist das Ergebnis der Intensitätsmessungen zu sehen. Zu sehen ist ein Histogramm der LEDs für die maximalen registrierten Photonen pro Puls. Dabei entspricht der orangene Graph den Messwerten des D-Eggs und der blau Graph den Messwerten des mDOMs. Da die LEDs in einem Kettenverbund (daisy chain) hintereinander verbaut sind, wurden noch die mittleren Werte pro Position in der Kette angegeben [\[18\]](#). Diese Messung sagt aus, dass im Allgemeinen die Photodioden durch die mDOM-LEDs 22 % mehr Intensität empfangen als durch die D-Egg-LEDs [\[11\]](#).

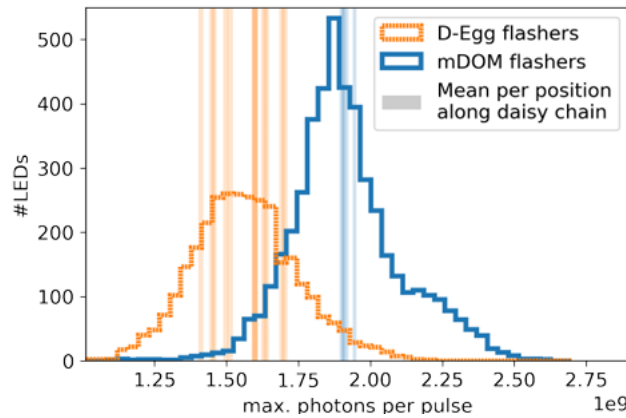


Abbildung 4.2: Histogramm der maximalen Photonenzahl pro Puls, in orange die Messdaten des D-Egg-LEDs und in blau die Messdaten des mDOM-LEDs [\[11\]](#)

Dies ist aufgrund der zuvor beschriebenen Ähnlichkeit des Aufbaus beider LED-Systeme nicht zu erwarten gewesen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird darauf eingegangen, ob die Ergebnisse Bestand haben oder doch die unterschiedlichen Abstände zwischen LED-Spitze und Photodiodegehäuse einen Einfluss auf die Messergebnisse hatten.

4.2 Neuer Teststand

Um nun einen neuen Teststand zur Intensitätsmessung zu entwickeln waren folgende Dinge zu beachten:

- Der neue Teststand sollte die den grundlegenden Aufbau der bisherigen Teststände kopieren und beide miteinander Vergleichbar machen
- Die alten Teststände hatten für den mDOM und das D-Egg unterschiedliche Abstände von der LED-Spitze zur Photodiode, daher musste der LED-Halter in seiner Position verschiebbar gemacht werden

- Wir haben uns im Vorfeld gegen eine Messung mit Photodiode und für eine Aufnahme der Intensität über einen Schirm aus Papier entschieden
- Der Sitz der LED muss beim Verschieben des LED-Halters sicher in der Position bleiben um Messfehler durch verrutschen der LED zu vermeiden

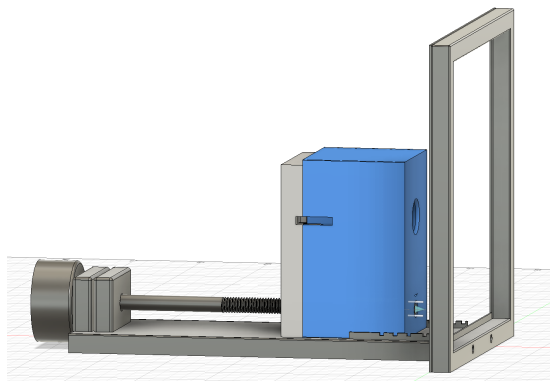


Abbildung 4.3: Darstellung des neuen Teststandes via Fusion 360

In [Abbildung 4.3](#) ist der neue Teststand zur Intensitätsmessung der LEDs abgebildet. Dieser verfügt über den LED-Halter in blau, welcher sich innerhalb der Führungen durch die Kurbel (M6x1 mm) (links in [Abbildung 4.3](#)) nach vorne und hinten bewegen lässt. Innerhalb des grauen Rahmens (rechts in [Abbildung 4.3](#)) lässt sich ein Papierschirm einspannen, auf welchem ein Millimeterraster aufgedruckt ist. Über den Papierschirm wird später die Intensitätsmessung ablaufen.

4.3 Versuchsdurchführung

Bevor mit einer Testreihe an Bildern begonnen werden kann, wird ein Bild mit Raumlicht vom Millimeterraster auf der Rückseite des Papierschirms (dies entspricht in [Abbildung 4.3](#) einem Foto von rechts) gemacht. Dies dient der Scharfstellung der Kamera (Canon EOS 7D) und um später in der Auswertung eine Zuordnung von Pixel zu Millimetern machen zu können. Daraufhin wird das Raumlicht ausgeschaltet.

In jeder Testreihe wurden Bilder mit einer Kamera von der Rückseite des Papierschirms gemacht. Eine Testreihe entspricht dabei dem Vermessen einer LED mit sieben Bildern. Sechs Bilder für sechs Abstände zwischen LED-Spitze und dem Papierschirm, bei angeschalteter LED auf voller Intensität und einem Bild mit ausgeschalteter LED. Das siebte Bild, bei welchem die LED ausgeschaltet ist, wird später verwendet um die Hintergrundhelligkeit des Raumes aus den gemessenen Intensitäten herausrechnen zu können. Diese sechs Abstände ergeben sich aus drei Abständen für den mDOM und drei Abständen

4 Intensitätskalibration D-Egg und mDOM Flasher

für das D-Egg. Die drei Abstände für den mDOM bzw. das D-Egg ergeben sich aus einem Abstand, der dem gemessenen Abstand zwischen LED-Spitze und Gehäuse der Photodiode (plus dem Abstand vom Gehäuse zur photosensitiven Fläche) entspricht. Die beiden anderen Abstände, dem gemessenen Abstand (plus dem Abstand vom Gehäuse zur photosensitiven Fläche) ± 0.5 mm. Dieser zusätzliche Abstand vom Gehäuse der Photodiode bis zur photosensitiven Fläche wird in [Abschnitt 4.4](#) besprochen.

Die Bodenplatte des Teststandes wurde mit einer Schraubzwinge am Tisch befestigt (vgl. [Abbildung 4.4](#)) um ein Verschieben beim Drehen der Kurbel zu vermeiden. Die Kamera steht auf einem Stativ, statisch am selben Ort und wurde mit einem Fernauslöser betätigt. Dieser diente der Vermeidung von Verwackelungen.

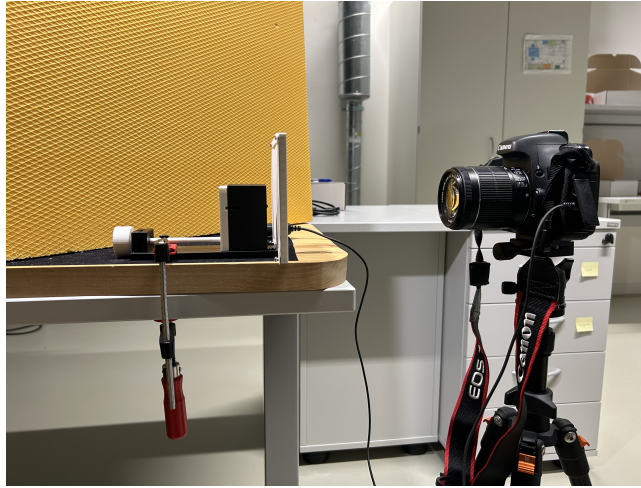
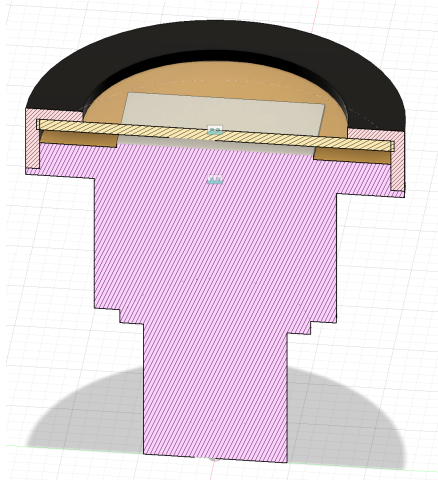


Abbildung 4.4: Foto des Versuchsaufbaus einschließlich der Kamera

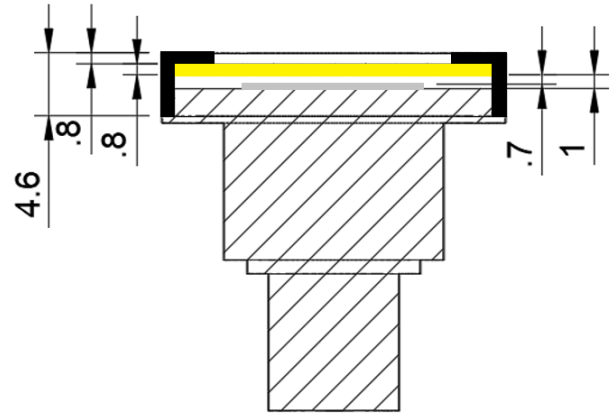
4.4 Integrationsflächen

In [Abschnitt 4.2](#) wurde bereits erwähnt, dass einer der größten Unterschiede zwischen den bisherigen und dem neuen Teststand der Verzicht auf eine Photodiode ist. Um die Messungen der bisherigen Teststände mit den Messungen mit dem neuen Teststand vergleichen zu können, müssen die Effekte der Photodiode im neuen Teststand modelliert werden. Dafür ist es nötig den genauen Aufbau der Photodiode zu kennen.

Wie in [Abbildung 4.5b](#) zu sehen ist, hat das Gehäuse, welches in [Abbildung 4.5](#) schwarz gekennzeichnet ist, eine Materialstärke von 0.8 mm, das Glas (gelb in [Abbildung 4.5](#)) ebenfalls eine Stärke von 0.8 mm und der Luftspalt zwischen Glas und Silizium (grau in [Abbildung 4.5](#)) das Maß 0.7 mm. Zusammen macht das nochmal einen zusätzlichen Abstand von 2.3 mm der auf die schon bekannten Abstände für die Teststände aufaddiert



(a) Fuison 360 Ansicht des Schnitts der Photodiode



(b) Bemaßungen des Schnitts

Abbildung 4.5: Aufbau der Photodiode

werden muss. Mit den in [Abschnitt 4.1](#) gemessenen Abständen zwischen LED-Spitze und dem Gehäuse der Photodiode und den inneren Maßen der Photodiode macht das einen Abstand zwischen LED-Spitze und Papierschirm für das D-Egg von 8.5 ± 0.5 mm und für den mDom 3.6 ± 0.5 mm. Aufgrund des Aufbaus wurde für den mDOM ein Abstand von 3.5 ± 0.5 mm verwendet, da nur halbzahlige Umdrehungen präzise mit der Kurbel möglich sind.

Da die photosensitive Fläche (grau) der Photodiode durch eine Quarzglasscheibe (gelb) von der Umgebung getrennt ist, muss der Effekt der Quarzglasscheibe auf den Lichtstrahl zusätzlich modelliert werden [8]. Um die Brechungseffekte am Übergang zwischen der Luft und dem Quarzglas richtig zu bestimmen, wird der Öffnungswinkel der LED im Nahfeld (<1 cm) benötigt. Dieser wurde experimentell bestimmt. Dafür wurden Bilder von der Rückseite des Papierschirms aufgenommen (vgl. [Abschnitt 4.3](#)) wobei der LED-Halter zwischen den Bildern verschoben wurde. Durch die Änderung des auf den Fotos zu sehenden Kreisdurchmessers konnte der Öffnungswinkel von 28° bestimmt werden (vgl. [Abbildung 4.6](#)).

Mit dem Öffnungswinkel des Lichtstrahls von 28° und dem Snelliusschen Brechungsgesetz

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2)$$

konnte der Einfluss der 0.8 mm dicken Quarzglasscheiben berechnet werden. Da an den beiden Grenzflächen Luft auf Quarzglas bzw. Quarzglas auf Luft (vgl. [Abbildung 4.5a](#)) trifft, wird der Lichtstrahl zwei mal gleich gebrochen. Der Unterschied zwischen dem zweimal gebrochenen Strahl, der durch das Glas verläuft und einem Lichtstrahl der nur durch Luft propagiert, liegt im Radius bei 0.08 mm. Ich habe mich daher entschieden

4 Intensitätskalibration D-Egg und mDOM Flasher

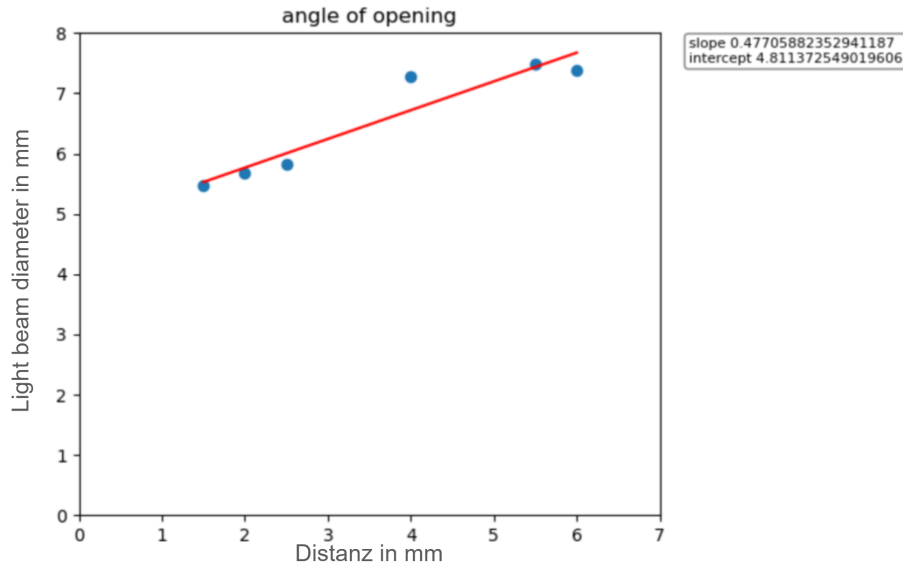


Abbildung 4.6: Durchmesser des Lichtstrahls (Kreise) aufgetragen über die Entfernung des Schirmes von der LED Spitze mit einer roten Geraden angelegt

den Durchmesser des Detektors um 0.2 mm im Vergleich zum Datenblatt zu erhöhen. Um überhaupt reale Größen wie Millimeter der Bildgröße Pixel zuzuordnen, wurde das Millimeterraster auf der Rückseite des Papierschirms genutzt. Denn wie in [Abschnitt 4.3](#) beschrieben wurde zu Beginn die Kamera scharfgestellt und ein Foto des Rasters gemacht. Durch die bekannte Größe der kleinen, dünn umrandeten Kästchen von 1 mm bzw. der größeren, dick umrandeten Kästchen von 10 mm (vgl. [Abbildung 4.7](#)) konnten die Pixel den Millimeter zugeordnet werden.

Die Dimensionen des angedeuteten Rechtecks in [Abbildung 4.7](#) konnten mithilfe des Programms Siril ausgelesen werden, denn diese werden am unteren linken Rand des Programms angegeben [17].

Zur Bestimmung der Intensität, welche eine Photodiode anstelle des Papierschirms sehen würde, wurden zwei Integrationsflächen festgelegt. Eine für die photosensitive Region der Photodiode und eine für den Schirm (vgl. [Abbildung 4.9](#)). Die Integrationsfläche für den Schirm wurde benutzt um die relative Intensität, welche in der Integrationsfläche der Photodiode landet, zu bestimmen.

In [Abbildung 4.8](#) ist die Draufsicht der Photodiode aus dem Datenblatt zu sehen. Das bedeutet, dass aus dem angegebenen Durchmesser der photosensitiven Region von 11.3 mm für die Auswertung ein Durchmesser von 11.5 mm werden muss um den fehlenden Effekt der Glasscheibe zu korrigieren. Für die Integrationsflächen des Schirms wurde der kürzeste Abstand zwischen Kreismittelpunkt und Beginn des Rahmens gewählt.

In [Abbildung 4.9](#) ist das resultierende Bild, welches für die Intensitätsmessungen ver-

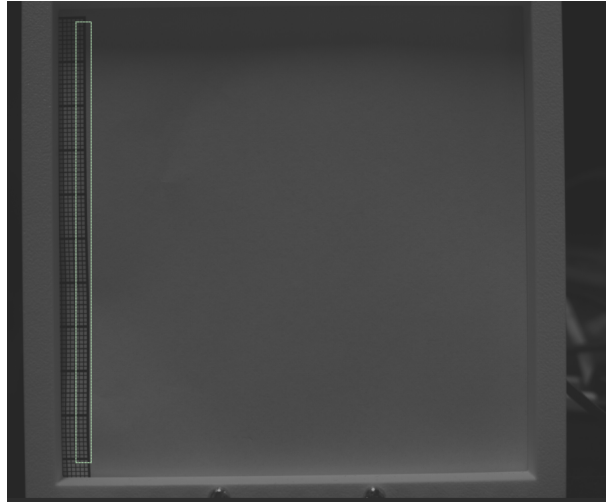


Abbildung 4.7: Auszug der Kameraaufnahme der Rückseite des Papierschirms

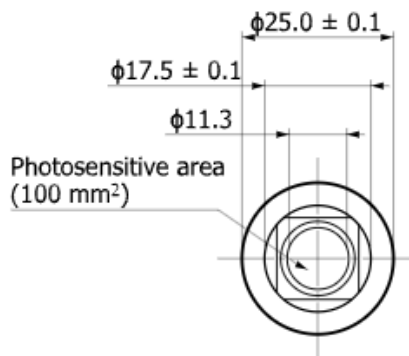


Abbildung 4.8: Dimensionen der Photodiode [8]

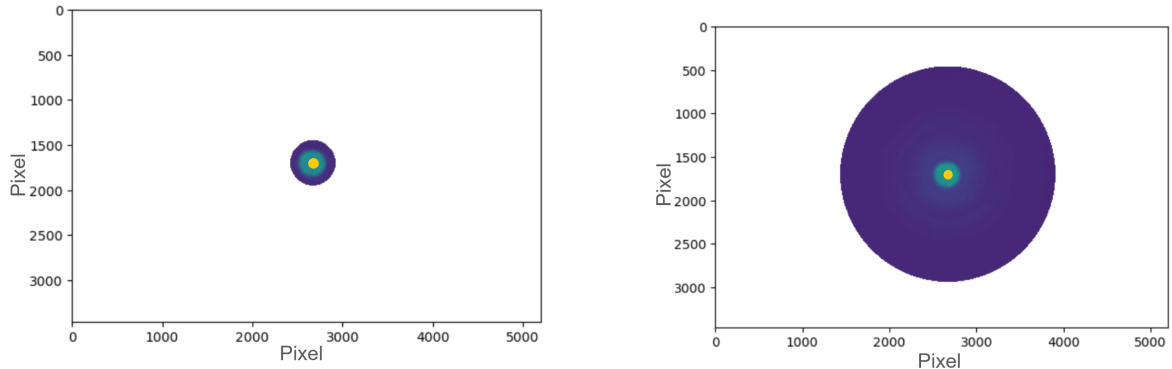
wendet wird, zu sehen. Der äußere weiße Bereich besitzt einen Intensitätswert von Null. Daher ergibt die Integration der Intensitäten über das gesamte Bild denselben Wert wie der Intensität innerhalb des Kreises.

Im Kreiszentrum ist ein oranger Punkt eingezeichnet, welcher der optischen Überprüfung des Intensitätsschwerpunktes des Bildes dient.

4.5 Akzeptanztests der Bilder

Um zu gewährleisten, dass die aufgenommenen Bilder der RGB-Kamera mit Bayer-Sensor auch verwendet werden können, musste sichergestellt werden, dass die einzelnen Farbkanäle der Kamera nicht überbelichtet sind und die Dimensionierung des Papierschirms ausreicht.

4 Intensitätskalibration D-Egg und mDOM Flasher



- (a) Integrationsfläche für photosensitiven Bereich der Photodiode mit eingezeichnetem Intensitätsschwerpunkt (orange)
- (b) Integrationsfläche für den Papierschirm mit eingezeichnetem Intensitätsschwerpunkt (orange)

Abbildung 4.9: Integrationsflächen

Durch das Bestrahlen des Papierschirms mit der 405 nm LED wurden die fluoreszierenden Eigenschaften von Papier ausgenutzt [18]. Durch diese wurden vom Papier selbst sichtbares Licht im blauen Bereich abgestrahlt [18]. Daher wurde der Fokus bei diesem Test auf den Blaukanal der Kamera gelegt.

Der Überbelichtungstest wurde über einen Profilplot der Intensität via Python gemacht. Hierfür wurde zuerst der Pixel bestimmt, der dem Intensitätsschwerpunkt des Bildes entspricht. Danach wurde der Intensitätsschwerpunkt zur optischen Überprüfung mit einem roten X im Bild markiert (vgl. [Abbildung 4.10a](#)) und eine blaue Linie horizontal mittig auf dem Schwerpunkt platziert (vgl. [Abbildung 4.10a](#)). Beide dienen rein der optischen Überprüfung. Im nächsten Schritt wurde der Profilplot entlang der blauen Linie ausgegeben (vgl. [Abbildung 4.10b](#)). Auf der Abszisse sind die Pixel aufgetragen seit Beginn der blauen Linie und auf der Ordinate die Intensität des Pixels.

Verwendet wurde eine 14-Bit-Kamera, d.h. die Kamera konnte aufgrund des Analog-Digital-Converters (ADC) Intensitätswerte von maximal $2^{14} = 16384$ registrieren ehe sie überbelichtet wäre [18]. Die verwendeten Kameraeinstellungen für die Testreihe waren eine Belichtungszeit von 8 Sekunden, eine Blendenöffnung von $\frac{f}{5,6}$ und eine ISO-Empfindlichkeit von 800 für die Bilder im Dunklen. Für die Auswertung wurde ein Bild mit dem Abstand 3 mm von der LED-Spitze bis zum Papierschirm verwendet. Dies entspricht dem geringsten verwendeten Abstand für die sechs Bilder aus [Abschnitt 4.3](#), daher müssten Bilder dieses Abstands die höchste Intensität der Testreihe aufweisen. Da in [Abbildung 4.10b](#) der maximale Intensitätswert nur etwas über 4000 entspricht, konnten alle Bilder verwendet werden.

Um die Dimensionierung des Schirms zu überprüfen wurden die Intensität, welche auf der Integrationsfläche des Schirms von der Kamera aufgenommen wurde, über die

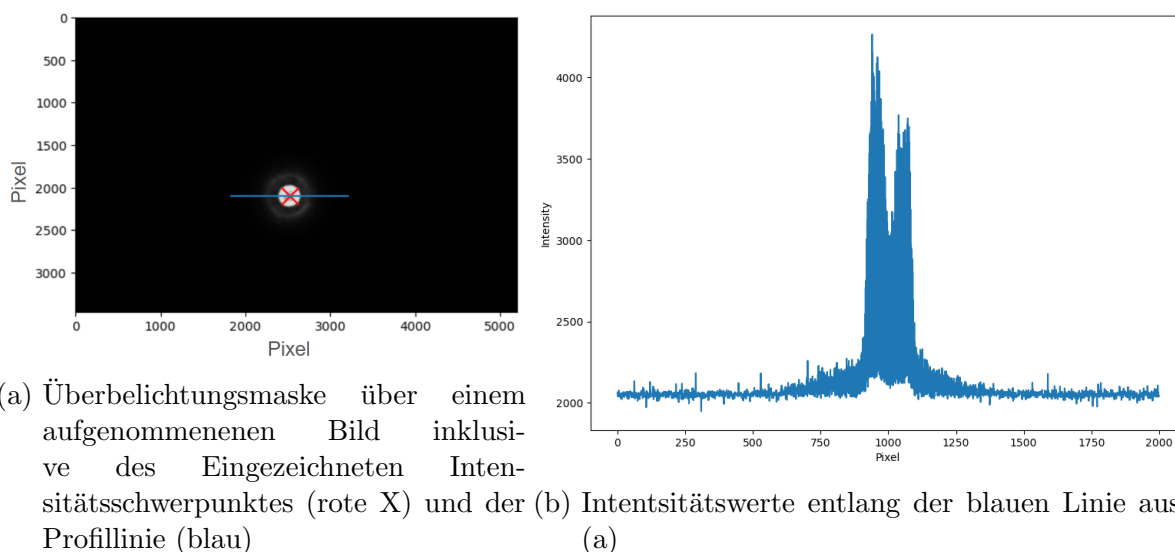


Abbildung 4.10: Überbelichtungstest

Abstände zwischen LED-Spitze und Papierschirm aufgetragen. In [Abbildung 4.11](#) ist ein Verlust von ca 10 % beim größten Abstand zu sehen. Dieser wurde bereits durch wiederholtes Vergrößern des Schirms reduziert. Bei den letzten Vergrößerungen wurde keine Änderung mehr festgestellt.

Da erwartet wurde, dass bei jedem Abstand auf dem Schirm die selbe Intensität, nur anders räumlich verteilt, gemessen wird, wurde für weitere Berechnungen der Mittelwert der gemessenen Intensitäten als Schirmintensität verwendet.

4.6 Ablauf der Auswertung

Nachdem alle Vortests besprochen wurden, kommt jetzt der Ablauf der Auswertung. Zuerst wurde das Bild auf dem das Gitter zu sehen ist verwendet, um die Anzahl der Pixel pro Millimeter händisch zu bestimmen. Diese wurde wiederum verwendet um den Integrationsflächen den richtigen Durchmesser in Pixeln zu geben.

Danach wurde das Bild ausgewählt, welches aufgenommen wurde als die LED an war und den geringsten Abstand zum Schirm hatte. Dieses wurde automatisch so bearbeitet, dass es danach nur noch aus Graustufen besteht. Dies ermöglicht es leichter die x- und y-Koordinate des Intensitätsschwerpunktes zu bestimmen. Diese Koordinaten wurden gespeichert, um diese später als Mittelpunkt der Integrationsflächen wiederzuverwenden. Die Bearbeitung des Bildes in Graustufen wurde daraufhin verworfen.

Als nächstes wurde das Dunkelbild, welches bei jeder Testreihe neu mit der ausgeschalteten LED gemacht wurde, geladen und die Hintergrundintensitäten des Raumes mithilfe der Integrationsflächen für den Detektor und der des Schirms berechnet. Diese

4 Intensitätskalibration D-Egg und mDOM Flasher

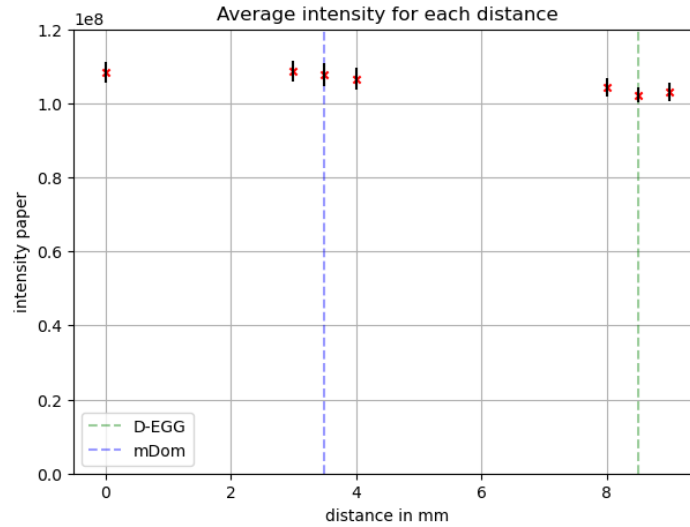


Abbildung 4.11: Gemessene Intensitäten (rot), inklusive Fehlerbalken, welche auf dem Papierschirm gemessen wurden aufgetragen über dem Abstand, des weiteren sind die Abstände zwischen LED-Spitze und Papierschirm für den mDOM (blau) und das D-Egg (grün) eingezeichnet

beiden Werte mussten bestimmt werden, um diese im weiteren Verlauf von den Intensitäten der Bilder, die aufgenommen wurden als die LED an war, abzuziehen. Genutzt wurden die rohen Kameradaten, ohne sie vorher aufzubereiten.

4.7 Ergebnis

In [Abbildung 4.12](#) ist die Division der gemessenen Intensität in der Integrationsfläche für den photosensitiven Teil der Photodiode (Detektorfläche) und der gemessenen Intensität der Integrationsfläche des Schirms über den Abstand der LED-Spitze zum Papierschirm aufgetragen zu sehen. Diese Intensitätsquotienten sind das Ergebnis aus acht Testreihen bei der jeweils eine LED vermessen wurde. Der Abfall des Quotienten bei zunehmender Distanz ist durch die Ausbreitung des Lichtkegels zu erklären. Da dem Lichtkegel mit zunehmender Distanz ein immer größerer Kegelboden zugrunde liegt und die Detektorfläche auf dem Schirm konstant über alle Distanzen bleibt, verringert sich innerhalb der Detektorfläche die registrierte Intensität.

Interessant ist, dass obwohl die LED-Spitze den Papierschirm berührt nur $87.3 \pm 2.3\%$ der Intensität auf dem Schirm innerhalb der Detektorfläche registriert wird. In der Entfernung des mDOMs von 3.5 mm wurden nur noch $62.6 \pm 2.1\%$ der Schirmintensität gemessen. Beim D-Egg-Abstand nur noch $54.0 \pm 1.8\%$. Dies bedeutet, dass die Photodiode im D-Egg-Teststand aufgrund des Abstandsunterschieds nur $86 \pm 4\%$ der Intensität

der Photodiode im mDOM-Teststand registriert.

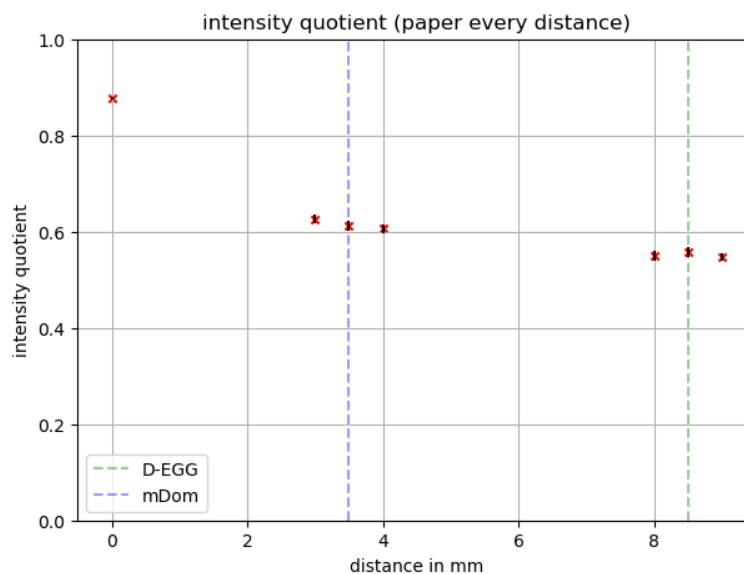
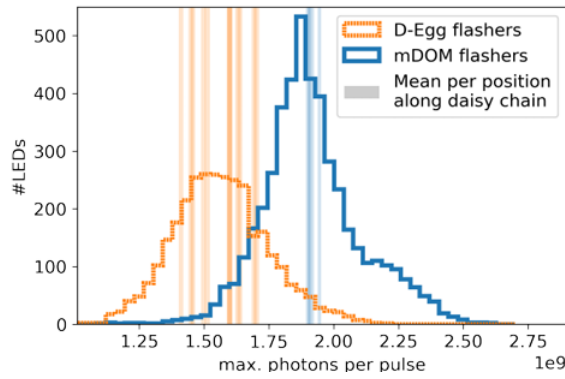


Abbildung 4.12: Quotienten aus Detektor- und Schirmintensität über die Abstände aufgetragen, wobei die gemittelten Schirmintensität verwendet wurde. Des weiteren sind die Abstände zwischen LED-Spitze und Papierschirm für den mDOM (blau) und das D-Egg (grün) eingezeichnet.

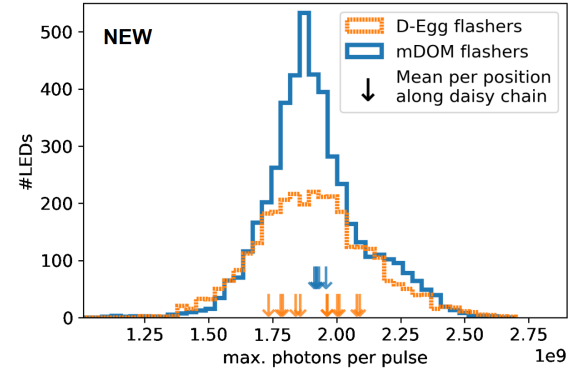
Berücksichtigt man die Auswirkung der Abstandsunterschiede für die gemessenen Intensitäten des D-Eggs, erhält man eine reskalierte Version von [Abbildung 4.2](#) (bzw. [Abbildung 4.13a](#)).

In [Abbildung 4.13b](#) ist nun zu sehen, dass die korrigierten mittleren Werte aus den Messdaten der Teststände nun deutlich näher aneinanderliegen. Die größere Streuung der Positionsmittelwerte in der daisy chain wurde aufgrund des Distanzunterschieds jedoch nicht behoben.

4 Intensitätskalibration D-Egg und mDOM Flasher



(a) Histogramm der maximalen Photonenanzahl pro Puls, in orange die Messdaten des D-Egg-LEDs und in blau die Messdaten des mDOM-LEDs [11]



(b) Reskalierte Version der Messwerte für das D-Egg von (a) [11]

Abbildung 4.13: Überarbeitung von [Abbildung 4.2](#)

5 Temperaturabhängigkeit der LEDs

Wie bereits in [Abschnitt 2.3](#) beschrieben, befindet sich das komplette Volumen des Detektors im Eis [\[2\]](#). Aufgrund des überdauernden Sitzes der optischen Module im Eis nehmen die kompletten Module die Umgebungstemperatur im Eis an. In [Abbildung 5.1](#) ist eine Temperatur-Tiefen-Zuordnung für das Eis am Südpol zu sehen [\[16\]](#). Da die ersten optischen Module ab einer Tiefe von 1450 m beginnen und die tiefsten sich bei 2450 m befinden, sind die Module den Temperaturen -20°C bis -43°C ausgesetzt [\[2, 16\]](#).

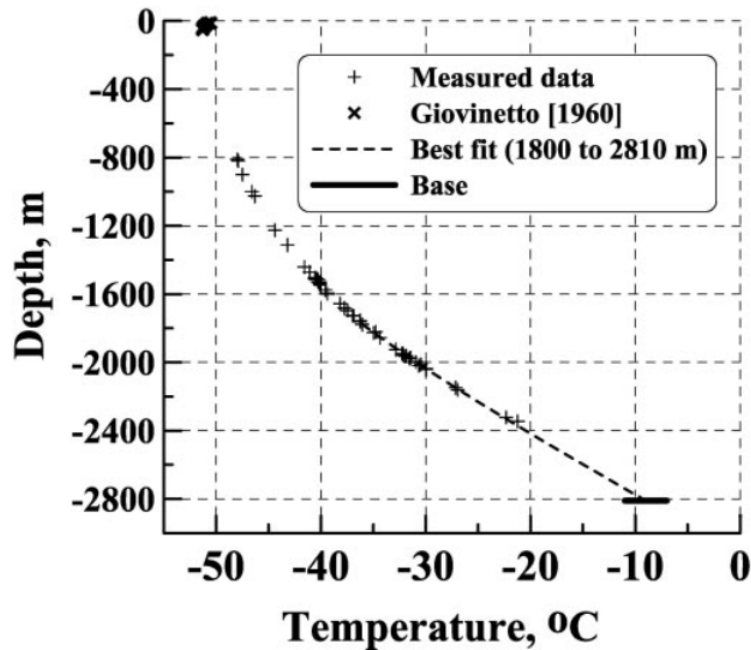
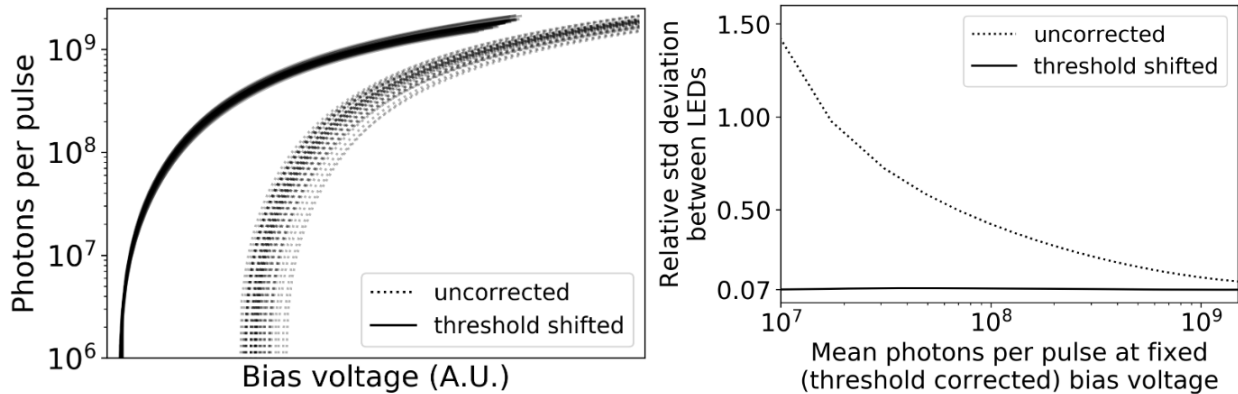


Abbildung 5.1: Temperatur des Eises gemessen aus Bohrlöchern [\[16\]](#)

Ziel war es, die Photonenabgabe pro Puls der LEDs gezielt einstellen zu können, damit jede LED einen bekannten Wert an Photonen ins Eis abgeben kann. Die vordefinierte Abgabe an Photonen wurde bereits bei Raumtemperatur erreicht, indem man die anliegende Spannung an den LEDs, für jede LED, unterschiedlich einstellt [\[11\]](#). Zusehen ist in [Abbildung 5.2a](#), dass der Absolutwert der Abgabe der Photonen pro

5 Temperaturabhängigkeit der LEDs

Puls für jede LED unterschiedlich ist, aber der Verlauf jedes gepunkteten Hyperbelastes, wenn die Spannung erhöht wird, für alle LEDs gleich erscheint. Gestützt wird das durch die Verschiebung, in [Abbildung 5.2a](#) als “threshold shifted“ gekennzeichnet, der unkorrigierten Äste zusehen ist [11]. In [Abbildung 5.2b](#) zeigt sich, dass diese Vorspannungskorrektur die relative Standardabweichung zwischen den LEDs reduziert [11].



(a) Photonen pro Puls über die Vorspannung, die gepunkteten Graphen sind die unveränderten Messergebnisse, die durchgezogenen nach der Vorspannungskorrektur [11]

(b) Relative Standardabweichung der LEDs aufgetragen über die durchschnittlichen Photonen pro Impuls bei fixer Schwellenwert-Korrektur der Vorspannung [11]

Abbildung 5.2: Vorspannungskorrektur der LEDs

5.1 Versuchsaufbau

Um die Temperaturen von -20°C bis -35°C für die Tests mit den LEDs zu simulieren, wurde die Kühlkammer Espec ARG-1100 verwendet. Diese Kühlkammer kann die Temperatur auf $\pm 0.3^\circ\text{C}$ genau halten [6]. Innerhalb der Kühlkammer wurde die Steuerelektronik der LED und die LED selbst positioniert. Die Photonen der LED wurden über eine Glasfaser zur Photodiode Hamamatsu S2281 geleitet [21, 8]. Die Steuerelektronik, die Verbindungskabel und die Stromkabel konnten aus der Kammer herausgeführt werden. Das Glasfaserkabel sollte keinen Einfluss auf die Messdaten bei unterschiedlichen Temperaturen haben, dies wurde allerdings nicht separat getestet.

Da nicht bekannt war, ob die Photodiode eine Temperaturabhängigkeit besitzt, wurde eine Testreihe mit der Photodiode und dem 16 Bit Analog-Digital-Converter (ADC) innerhalb der Kühlkammer und eine Testreihe mit beidem außerhalb der Kühlkammer durchgeführt [22]. In [Abbildung 5.3](#) sind die von der Photodiode gemessenen relativen

5.2 Intensitätsmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen

maximalen Photonen pro Puls für beide Anordnungen über die Temperatur angeben. In rot die Messwerte für die Messung mit der Photodiode und ADC außerhalb der Kühlkammer und schwarz für innerhalb. Durch den Versuchsaufbau und -auswertung wurden nicht die ADC-Werte sondern die Digital-Analog-Converter (DAC) Werte ausgelesen. Da durch das Umpositionieren der Photodiode die Glasfaser bewegt wurde und der Einfluss der Bewegung unbekannt ist, wurden die Messergebnisse relativ zu dem bei 20 °C aufgetragen. Diese Messung wurde insgesamt für 14 verschiedene DAC-Werte im Bereich von 28 000 bis 65 000 durchgeführt und es wurden keine systematischen Abweichungen festgestellt. In weiteren Tests wurde die Photodiode deshalb innerhalb der Kühlkammer gelassen.

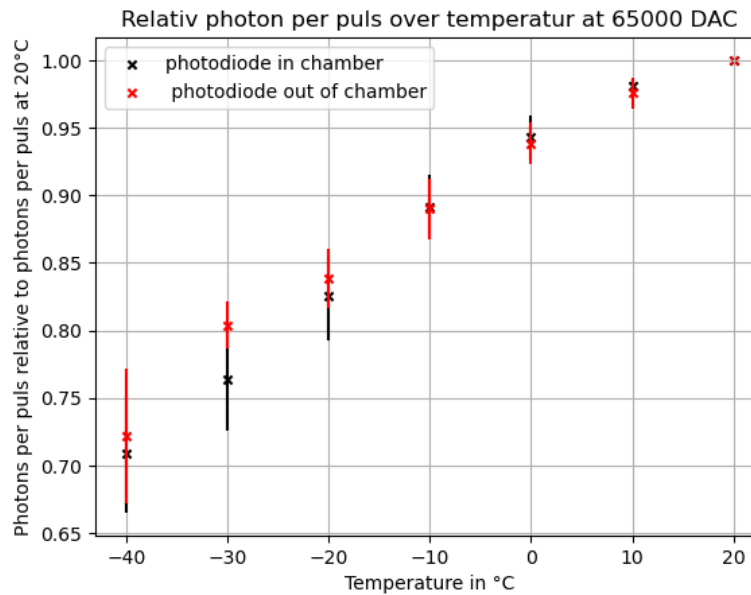


Abbildung 5.3: Relativen maximalen Photonen pro Puls über die Temperatur bei einem DAC-Wert von 65000, in schwarz die Messwerte mit Photodiode in der Kühlkammer, rot außerhalb der Kühlkammer

5.2 Intensitätsmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen

In [Abbildung 5.4](#) sind die Messergebnisse für eine LED zu sehen. Dabei wurde die Temperatur in 10 °C Schritten von -40 °C bis 20 °C erhöht. Für jede Temperatur wurden die 14 verschiedenen DAC-Werte gemessen. Zu sehen ist, dass die DAC-Werte sowie die Umgebungstemperatur einen Einfluss auf die absoluten Messwerte der ausgesendeten

5 Temperaturabhängigkeit der LEDs

Photonen der LED haben. Ersteres war bereits aus [Abbildung 5.2a](#) bekannt.

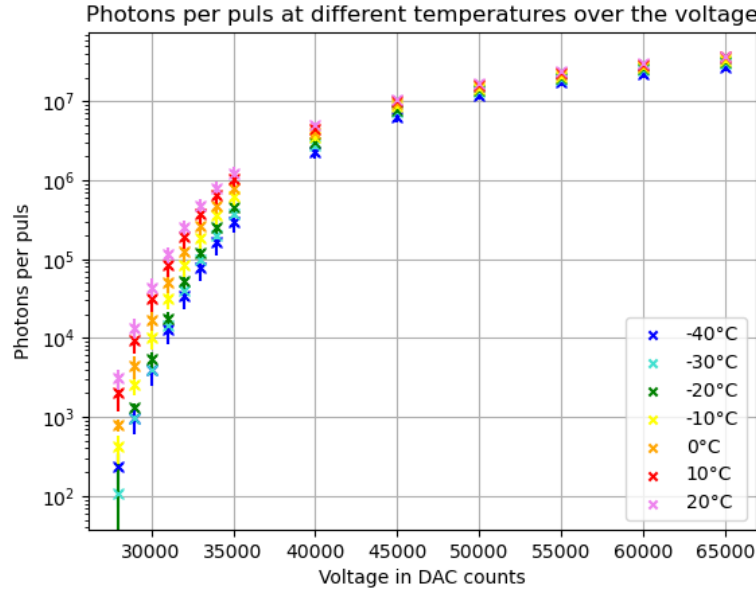


Abbildung 5.4: Absoluten maximalen Photonen pro Puls über die Spannungen bei allen Temperaturen, die Kreuze entsprechen den Messwerten bei unterschiedlichen Temperaturen, die Striche den Fehlerbalken

Die Temperaturabhängigkeit scheint lediglich die registrierten Photonen zu beeinflussen, gleichbleibend über alle DAC-Werte. Daher wurde versucht, die Hyperbeläste der einzelnen Temperaturmessungen durch eine individuelle Korrektur der DAC-Werte für jede Temperatur zu verschieben. Dies ist in [Abbildung 5.5](#) zu sehen. Die Punkte spiegeln die selben Messwerte wie auch schon in [Abbildung 5.4](#) wieder. Die gestrichelten Linien wurden aus einer Interpolation der Messwerte der einzelnen Temperaturen gewonnen und im Anschluss verschoben. Dies hat den Effekt, ähnlich den aus [Abbildung 5.2a](#), dass die Streuung aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen an abgegebenen Photonen der LED verringert werden kann durch das Verändern der DAC-Werte.

In [Abbildung 5.6](#) sind die errechneten DAC-Werte über die Temperatur aufgetragen. Die Kreise in den unterschiedlichen Farben entsprechen den Messwerten der sechs LEDs. Der Mittelwert pro Temperatur ist zusätzlich mit einem schwarzen X eingezeichnet, wie auch die Fehlerbalken. Da bereits die Messwerte der getesteten LEDs bei Raumtemperatur bekannt sind, wurde 20°C als Ausgangspunkt der Auswertung genommen [11]. Zu sehen ist, dass eine größere Vorspannungskorrektur bei niedrigen Temperaturen gemacht werden muss, um die Photonenzahl temperaturunabhängig zu bekommen.

5.2 Intensitätsmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen

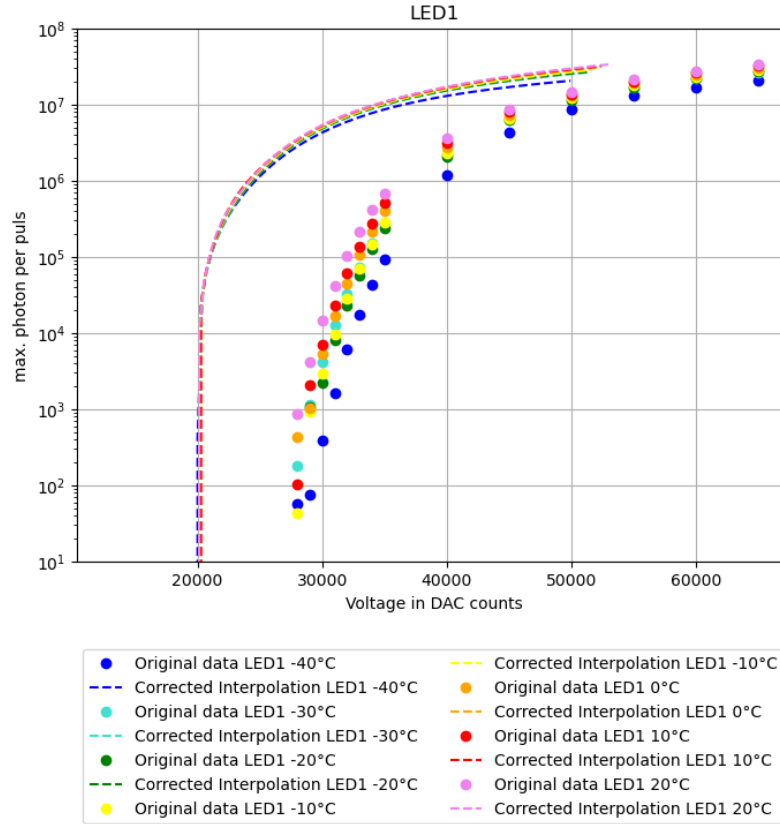


Abbildung 5.5: Absoluten maximalen Photonen pro Puls (Kreise) über die Spannungen bei allen Temperaturen. Die gestrichelte Linie ergibt sich aus der Interpolation der Messwerte und dem Versatz durch die Vorspannungskorrektur

5 Temperaturabhängigkeit der LEDs

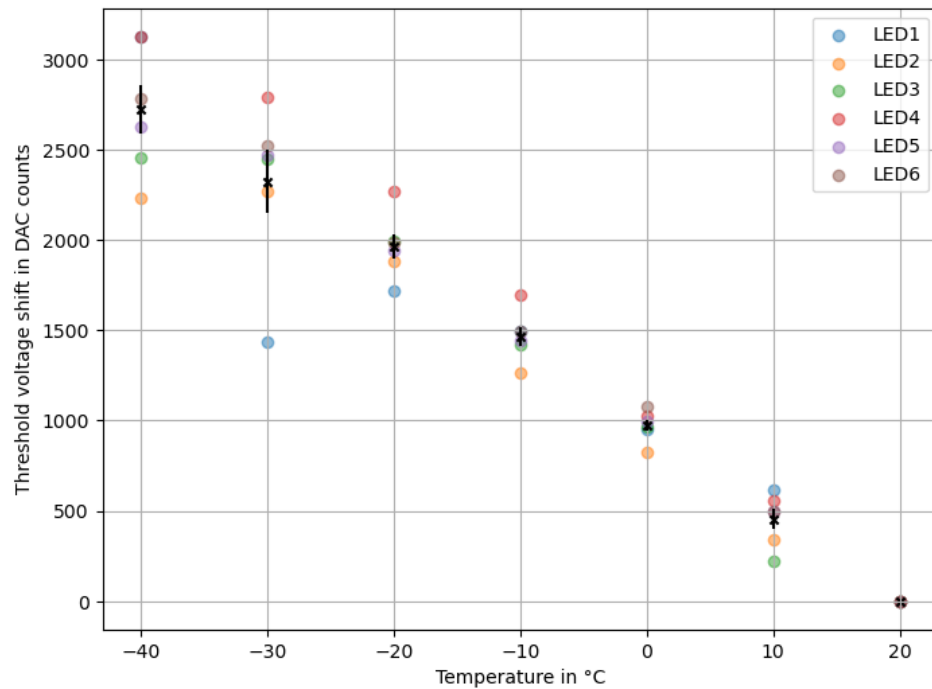


Abbildung 5.6: Nötigen Korrekturen der DAC-Werte pro LED (farbigen Kreise) über die Temperatur. Die schwarzen Kreuze geben den Mittelwert aller LED Messwerte pro Temperatur an und die Striche sind die Fehlerbalken.

6 Zusammenfassung

Das IceCube Neutrino Observatorium instrumentalisiert ca. 1 km^3 an Eis am geographischen Südpol [2]. Das instrumentalisierte Volumen besteht aus mehr als fünftausend Lichtsensoren, den Digitalen-Optischen-Modulen (DOM) in einer Tiefe von 1450 m bis 2450 m [2, 22]. Jeder DOM ist mit einem photomultiplier tube (PMT) ausgestattet, um ausgesendetes Licht einer hoch energetischen Neutrino-Interaktion zu registrieren [22].

In 2025/26 soll IceCube mit dem IceCube Upgrade seine erste Erweiterung bekommen [2]. Die neuen ins Eis gelassenen Kabel werden mit ca. 700 optischen Modulen ausgestattet sein [13]. Unter diesen optischen Modulen sind das Multi-PMT Digital Optical Modul (mDOM) und das Digital-Egg (D-Egg) [13]. Die bereits im Eis verbauten DOMs verfügen, wie auch die noch nicht verbauten mDOM und das D-Egg, über LEDs [13]. Diese LEDs sind in der Lage Photonen ins Eis, zur Vermessung der optischen Eigenschaften, zu schicken [13]. Die optischen Eigenschaften des Eises sind noch die größte Quelle für systematische Unsicherheiten bei der Rekonstruktion des Photonenwegs [13]. Der Fokus liegt in dieser Arbeit auf dem mDOM und D-Egg LED-System. Der mDOM und das D-Egg besitzen ein ähnliches LED-System, denn sowohl die LED, der Pulstreiber als auch der Schaltplan stimmen überein [18].

Eine durchgeführte Messung sagte aus, dass im Allgemeinen die Photodioden durch die mDOM-LEDs 22 % mehr Intensität empfangen als durch die D-Egg-LEDs [11]. Dies war aufgrund des ähnlichen Aufbaus des LED-Systems unerwartet. In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass aufgrund von Abstandsunterschieden in den bisherigen Testständen die Photodiode im D-Egg-Teststand nur $86 \pm 4\%$ der Intensität der Photodiode im mDOM-Teststand registriert. Nach Anpassung der Messdaten verhalten sich beide Systeme ähnlicher.

Des Weiteren wurde herausgefunden, dass das LED-System einer Temperaturabhängigkeit unterliegt. Denn bei abnehmender Temperatur sendet die LED weniger Photonen bei gleicher anliegender Spannung aus. Dies kann aber durch eine individuell angepasste Vorspannung auf einen bestimmten Photonenwert pro Puls normiert werden. Damit trug diese Arbeit bei, die LED-Systeme beider optischen Module besser zu verstehen und ermöglicht es, die abgegebenen Photonen pro Puls jeder LED, unabhängig von der Temperatur, auf einen bestimmten Wert kalibrieren zu können.

Literatur

- [1] M. Aartsen u. a. “The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems”. In: *Journal of Instrumentation* 12.03 (März 2017), P03012–P03012. ISSN: 1748-0221. DOI: [10.1088/1748-0221/12/03/p03012](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/p03012). URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/P03012>.
- [2] R. Abbasi u. a. “In situ estimation of ice crystal properties at the South Pole using LED calibration data from the IceCube Neutrino Observatory”. In: *The Cryosphere* 18.1 (2024), S. 75–102. DOI: [10.5194/tc-18-75-2024](https://tc.copernicus.org/articles/18/75/2024/). URL: <https://tc.copernicus.org/articles/18/75/2024/>.
- [3] T. Anderson u. a. *Design and performance of the multi-PMT optical module for IceCube Upgrade*. 2021. arXiv: [2107.11383](https://arxiv.org/abs/2107.11383) [astro-ph.IM]. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.11383>.
- [4] H. F. /. P. /. Anony. *Electromagnetic spectrum*. Abgerufen am 8. März 2025. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3726606>.
- [5] W. Demtroder. *Experimentalphysik 1*. de. 8. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Germany: Springer, Dez. 2017.
- [6] Espec. *Environmental Stress Chamber*. Product manual for AR series Standard Type. ESPEC Europe GmbH. URL: https://espec.de/wp-content/uploads/2023/03/AR_series-brochure-Standard-type.pdf.
- [7] C. Grupen. *Einstieg in Die Astroteilchenphysik*. de. 2. Aufl. Berlin, Germany: Springer, Jan. 2018.
- [8] Hamamatsu Photonics. *Si photodiodes S2281 series*. Product manual Si photodiodes S2281 series. Hamamatsu Photonics, Inc. März 2025. URL: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s2281_series_kspd1044e.pdf.
- [9] B. Hampel. *Absorptionsspektroskopie Im Ultravioletten Und Sichtbaren Spektralbereich*. de. Vieweg+teubner Verlag, Jan. 1962.
- [10] C. Hill u. a. *Performance of the D-Egg Optical Sensor for the IceCube Upgrade*. 2021. arXiv: [2108.05353](https://arxiv.org/abs/2108.05353) [physics.ins-det]. URL: <https://arxiv.org/abs/2108.05353>.

Literatur

- [11] IceCube-collaboration. “The LED calibration system for the mDOM and D-EGG sensor modules of the IceCube Upgrade : Design, production, testing and use in module calibration”. Nicht veröffentlicht.
- [12] IceCube-Gen2-Collaboration u. a. *The IceCube Neutrino Observatory - Contributions to ICRC 2017 Part VI: IceCube-Gen2, the Next Generation Neutrino Observatory*. 2017. arXiv: [1710.01207](https://arxiv.org/abs/1710.01207) [astro-ph.IM]. URL: <https://arxiv.org/abs/1710.01207>.
- [13] A. Ishihara. *The IceCube Upgrade – Design and Science Goals*. 2019. arXiv: [1908.09441](https://arxiv.org/abs/1908.09441) [astro-ph.HE]. URL: <https://arxiv.org/abs/1908.09441>.
- [14] C. Kopper. *Cascade 1TeV in ice*. Abgerufen am 8. März 2025. URL: https://user-web.icecube.wisc.edu/~ckopper/cascade_1TeV_in_ice.mp4.
- [15] “Measurement of the multi-TeV neutrino interaction cross-section with IceCube using Earth absorption”. In: *Nature* 551.7682 (Nov. 2017), S. 596–600. ISSN: 1476-4687. DOI: [10.1038/nature24459](https://doi.org/10.1038/nature24459). URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature24459>.
- [16] P. B. Price u. a. “Temperature profile for glacial ice at the South Pole: Implications for life in a nearby subglacial lake”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99.12 (Juni 2002), S. 7844–7847. ISSN: 1091-6490. DOI: [10.1073/pnas.082238999](https://doi.org/10.1073/pnas.082238999). URL: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.082238999>.
- [17] C. Richard u. a. “Siril: An Advanced Tool for Astronomical Image Processing”. In: *Journal of Open Source Software* 9.102 (Okt. 2024), S. 7242. ISSN: 2475-9066. DOI: [10.21105/joss.07242](https://doi.org/10.21105/joss.07242). URL: <http://dx.doi.org/10.21105/joss.07242>.
- [18] M. Rongen. *Private Kommunikation*.
- [19] M. Rongen. “Calibration of the IceCube Neutrino Observatory”. Diss. RWTH Aachen, 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1911.02016>.
- [20] C. Spiering. *Neutrinoastronomie: Blick in verborgene Welten*. de. 2021.
- [21] Thorlabs. *High-Power SMA Cables: User Guide*. Rev D. Product manual for MHP910L02 SMA cable. Thorlabs, Inc. Okt. 2022. URL: <https://www.thorlabs.us/drawings/e2a937fc5a0f65aa-380D841C-E267-BDB4-C6412EAC1FC58D8E/MHP910L02-Manual.pdf>.
- [22] D. Tosi und C. Wendt. *Calibrating the photon detection efficiency in IceCube*. 2015. arXiv: [1502.03102](https://arxiv.org/abs/1502.03102) [physics.ins-det]. URL: <https://arxiv.org/abs/1502.03102>.

Erklärung zur Hausarbeit gemäß 29 (Abs.6) LPOI

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig verfasst wurde und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt wurden. Weitere Personen waren an der Fertigung nicht beteiligt. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, sind in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Sofern die Arbeit unter Einsatz von Künstlicher Intelligenz als Werkzeug erstellt wurde, sind die entsprechenden Stellen der Arbeit unter Angabe des verwendeten Werkzeugs gekennzeichnet. Diese Erklärung erstreckt sich auch auf etwa in der Arbeit enthaltene Zeichnungen, Kartenskizzen und bildliche Darstellungen.

Ort, Datum

Unterschrift