



WESTFÄLISCHE WILHELMS-UNIVERSITÄT MÜNSTER

BACHELORARBEIT

**Simulationsstudien zum Einfluss der
Modulaufhängung auf die Photon-Sensitivität
des mDOM-Sensors im IceCube Upgrade**

Autor:
Moritz SCHLECHTRIEM

Gutachter:
Prof. Dr. Alexander KAPPES
Dr. Volker HANNEN

*Wissenschaftliche Arbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science*

in der

AG Kappes
Institut für Kernphysik
Fachbereich Physik

7. Januar 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
2	Grundlagen	3
2.1	Neutrinos	3
2.1.1	Neutrinos als Botenteilchen	3
2.1.2	Wechselwirkung mit Materie	4
2.2	Cherenkov-Effekt	4
3	IceCube Neutrino-Observatorium	7
3.1	Rekonstruktion von Ereignissen	8
3.2	IceCube-Erweiterungen	9
3.3	Das multi-PMT digital optical module	9
4	Durchgeführte Simulationen	13
4.1	Geant4	13
4.1.1	Konstruktion geometrischer Objekte	13
4.1.2	Physikalische Prozesse	14
4.2	Erweiterung des Geant4-Modells des mDOM um die Modulaufhängung	14
4.2.1	mDOM-Modell in Geant4	14
4.2.2	Modulaufhängung in Geant4	15
5	Einfluss der Modulaufhängung auf die Photon-Sensitivität des mDOM	21
5.1	Überblick über die Simulationsergebnisse	23
5.2	Seile und vertikale Bänder	24
5.3	Äquatorgürtel	28
5.4	Kabelaufbau	30
5.5	Gesamte Modulaufhängung	34
5.6	Wellenlängenabhängigkeit der Abschattung	36
6	Zusammenfassung und Ausblick	39
A	Anhang	41
A.1	Unsicherheiten	41
A.2	3-Seil-Aufbau	41
A.3	Skizzen der Aufhängung	43
	Literatur	49

1 Einleitung und Motivation

Der Fluss kosmischer Strahlung, der die Erde ununterbrochen trifft, wurde erstmals 1912 von Victor Hess bei einer seiner Ballonfahrten festgestellt. Auch gut 100 Jahre später ist der Ursprung dieser kosmischen Strahlung noch unklar. Verschiedene Quellen kommen infrage. Mit der kosmischen Strahlung treffen auch Neutrinos auf die Erde, die Materie nahezu unbemerkt durchdringen [1]. Kosmische Neutrinos sind in der Astronomie unter anderem deshalb von Interesse, weil ihre Detektion dazu beitragen kann, den Ursprung der kosmischen Strahlung zu finden. Da Neutrinos, massearme ungeladene Teilchen, nicht von elektromagnetischen Feldern im Kosmos abgelenkt werden, ist die Richtung ihrer Herkunft gut rekonstruierbar. Ihnen wird daher die Funktion der „smoking gun“, die auf die Quelle kosmischer Strahlung zeigt, zugeschrieben.

Die Eigenschaft der Neutrinos, nur schwach mit Materie wechselzuwirken, erschwert aber gleichzeitig ihre Detektion. Große Detektorvolumina sind notwendig, um Ereignisse der Neutrino-Materie-Wechselwirkung nachzuweisen. An verschiedenen Stellen auf der Erde werden sogenannte Neutrino-Teleskope betrieben oder befinden sich in der Planung. Dazu gehört auch das IceCube Neutrino-Observatorium, das sich eingelassen ins Gletschereis am Südpol befindet. Hier gelang 2013 erstmals der Nachweis kosmischer Neutrinos [2]. 2017 erfolgte mit IceCube die Detektion eines 290 TeV Myon-Neutrino, dem durch Beobachtungen elektromagnetischer Strahlung der Blazar TXS 0506+056 als Quelle zugewiesen werden konnte [3]. In Zukunft könnte die Detektion kosmischer Neutrinos ein wesentlicher Bestandteil der Multi-Messenger-Astronomie sein, bei der neben Neutrinos auch elektromagnetische Strahlung, Gravitationswellen und kosmische Strahlung zur Untersuchung kosmischer Objekte und Ereignisse zur Hilfe gezogen werden.

Um Neutrinos nachzuweisen, misst IceCube das Cherenkov-Licht der geladenen Sekundärteilchen, die bei Neutrino-Wechselwirkungen mit den Wassermolekülen des umliegenden Eises emittiert werden. Zur Detektion des Cherenkov-Lichts werden optische Module verwendet, die mit Hilfe von Photomultipliern (PMT) bereits einzelne Photonen nachweisen können. Für zukünftige Erweiterungen von IceCube werden derzeit weitere optische Module entwickelt. Das mDOM (**m**ulti-**P**M**T** **D**igital **O**ptical **M**odule) verfügt über 24 3-Zoll-PMTs, was gegenüber dem herkömmlichen Design mit einem einzelnen 10-Zoll-PMT eine erhöhte photosensitive Fläche und verschiedene weitere Vorteile mit sich bringt [4].

Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit ist die Untersuchung der Auswirkung der Modulaufhängung des mDOM-Sensors auf die Photonen-Akzeptanz des Moduls. Die durchgeführten Studien basieren auf einem Modell des mDOM in der Simulationssoftware Geant4. Teil dieser Arbeit ist die Erweiterung dieses Modells um die Modulaufhängung. Dadurch können mit dem Modell in Zukunft realistischere Simulationsergebnisse erzielt werden. Durch Simulation des Einfalls von Photonen aus verschiedenen Einfallswinkeln auf das Modul wird die Winkelakzeptanz des Moduls bestimmt. Dies ermöglicht es, den Verlust an Photonen durch Aufhängung zu quantifizieren.

2 Grundlagen

Betrachtet man die Bestandteile der Materie, so gelangt man von makroskopischen Objekten bis hin zu den grundlegendsten bekannten Teilchen, indem man sich die Frage stellt, woraus die uns umgebende Welt aufgebaut ist. Makroskopische Objekte bestehen aus Molekülen und Moleküle aus Atomen, welche wiederum Elektronen und Atomkern beinhalten. Im Falle des Elektrons sind derzeit keine kleineren Teilchen bekannt, aus denen es sich zusammensetzt. Das gleiche gilt für Quarks, aus denen sich Nukleonen, die Bestandteile der Atomkerne, zusammensetzen, und für eine Reihe weiterer Elementarteilchen. Alle Elementarteilchen, aus denen die Materie aufgebaut ist, sowie die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen (mit Ausnahme der Gravitation) werden vom Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben. Der folgende Abschnitt beschreibt die grundlegenden Eigenschaften der Neutrinos, ihre Bedeutung für die Astronomie und ihre Interaktion mit Materie.

2.1 Neutrinos

Innerhalb des Standardmodells gibt es die Unterscheidung zwischen Bosonen (Austauschteilchen) und Fermionen (Materie-Bausteinen). Fermionen lassen sich wiederum in Quarks und Leptonen unterteilen. Elektron, Myon und Tauon sind geladene Leptonen. Neutrinos vervollständigen die Klasse der Leptonen, wobei zwischen drei Sorten (engl. *flavours*) unterschieden wird: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos. Sie sind ungeladen und interagieren nur über die schwache Wechselwirkung und die Gravitation¹ mit ihrer Umgebung. Ihr geringer Wirkungsquerschnitt erlaubt es Neutrinos, Materie weitgehend unbeeinflusst zu durchdringen. Dies erschwert ihre Detektion, macht sie jedoch in der Astronomie zu nützlichen Boten, was im Folgenden weiter ausgeführt wird [6].

2.1.1 Neutrinos als Botenteilchen

Neben einigen ungeklärten Fragen rund um Neutrinos selbst, die etwa die Massenhierarchie oder die Flavour-Oszillationen betreffen, sind Neutrinos auch in der Astronomie von Bedeutung. Als Neutrinoquellen treten neben irdischen auch kosmische und neben unserer Sonne auch solche, die außerhalb unseres Sonnensystems oder der Milchstraße liegen, auf [4]. Wegen ihres geringen Wirkungsquerschnitts können Neutrinos ungehindert aus dem Innern kompakter Himmelskörper entweichen [7]. Wird ein solches Neutrino auf der Erde detektiert, können Informationen über das Himmelsobjekt, dem es entstammt, extrahiert werden. Ein entscheidender Vorteil der Neutrinos als Informationsquelle gegenüber kosmischer Strahlung ist, dass sie auf ihrem Weg aufgrund ihrer elektrischen Neutralität nicht von Magnetfeldern im Kosmos abgelenkt werden und ihre Herkunftsrichtung somit gut rekonstruierbar ist. Außerdem können aufgrund der großen mittleren freien Weglänge der Neutrinos, die sich aus ihrem geringen Wirkungsquerschnitt und der geringen Dichte im Raum ergibt, auch ferne Objekte observiert werden, deren Licht auf dem Weg zur Erde absorbiert wird [8].

¹Die gravitative Wechselwirkung der Neutrinos kann im Kontext der Teilchenphysik vernachlässigt werden. Für ihre Masse wurde $1,1 \text{ eV}/c^2$ als Obergrenze bestimmt [5].

2.1.2 Wechselwirkung mit Materie

Um die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung eines Neutrinos innerhalb eines Detektors und damit die Chance auf seine Detektion zu erhöhen, verfügen die meisten Neutrinoobservatorien über große Detektorvolumina. Wie in Abschnitt 2.1 diskutiert, ist bei Neutrinos ausschließlich die Interaktion über die schwache Wechselwirkung von Bedeutung. Je nach Energie des einfallenden Neutrinos sind unterschiedliche Prozesse dominant. Für Neutrino-Observatorien, die auf die Detektion hochenergetischer kosmischer Neutrinos ausgelegt sind, ist vor allem die tiefinelastische Streuung an Nukleonen von Bedeutung, die ab Neutrino-Energien von 10 GeV den dominanten Prozess darstellt [4]. Die tiefinelastische Streuung kann, je nach Sorte und Energie des einfallenden Neutrinos, über zwei Kanäle der schwachen Wechselwirkung erfolgen. Beim geladenen Strom wird das am Nukleon gestreute Neutrino ν_l durch Austausch eines W^\pm -Bosons in das entsprechende geladene Lepton $l = e, \mu, \tau$ umgewandelt:

$$\nu_l + N \xrightarrow{W^\pm} l + X. \quad (2.1)$$

Dabei ist N ein Proton oder ein Neutron und X ein hadronisches Restprodukt der Interaktion, das aus einem oder mehreren Hadronen besteht. Beim neutralen Strom wird ein Z^0 -Boson ausgetauscht:

$$\nu_l + N \xrightarrow{Z^0} \nu_l + X. \quad (2.2)$$

Das einfallende Neutrino gibt in beiden Fällen einen Teil seiner Energie an das hadronische Restprodukt X ab [8]. Die emittierten geladenen Leptonen durchqueren anschließend weiter den Detektor und strahlen Cherenkov-Licht ab. Dabei können sie weitere elektromagnetische bzw. hadronische Kaskaden auslösen. Die Detektion von Neutrinos erfolgt also stets indirekt über geladene Sekundärteilchen, die bei der tiefinelastischen Streuung oder in anschließenden Kaskaden entstehen. Die Bewegungsrichtung des Sekundärteilchens weicht im Bereich der betrachteten Neutrino-Energien kaum von der des ursprünglichen Neutrinos ab [4]. Neutrinoquellen im Kosmos können so zurückverfolgt werden.

2.2 Cherenkov-Effekt

Wenn ein elektrisch geladenes Teilchen ein dielektrisches Medium durchquert und dabei seine Geschwindigkeit v_c größer ist als die Lichtgeschwindigkeit c_0/n in diesem Medium, wobei c_0 die Vakuumlichtgeschwindigkeit und n der Brechungsindex des Mediums ist, tritt der Cherenkov-Effekt auf [9]. Dabei werden sogenannte Cherenkov-Photonen kegelförmig entlang der Trajektorie des geladenen Teilchens emittiert. Auf diese Weise ist es möglich, die geladenen Sekundärteilchen aus der Neutrino-Wechselwirkung mit Materie zu detektieren. Die sich im Medium fortbewegende Ladung induziert Dipole in den Atomen entlang ihrer Flugbahn [10]. Durch diese Anregung bildet jedes Atom in der Nähe der Flugbahn des Ladungsträgers ein elektromagnetisches Feld. In Abwesenheit des geladenen Teilchens relaxiert jedes Atom wieder in seinen Grundzustand. Erfolgt die Bewegung des Teilchens mit einer Geschwindigkeit, die unter der Phasengeschwindigkeit elektromagnetischer Strahlung im Medium c_0/n liegt, ist aus größerer Entfernung keine elektromagnetische Strahlung bemerkbar. Die Kugelwellen, die nach dem Huygen'schen Prinzip an jedem Punkt der Teilchenbahn durch die Abregung der Atome erzeugt werden, interferieren destruktiv. Propagiert das geladene Teilchen hingegen mit einer Geschwindigkeit $v_c > c_0/n$, bewegt es sich damit auch schneller als seine Polarisationswirkung auf das Medium [10]. In diesem Fall ist auch in größerer Entfernung ein elektrisches Feld messbar. Die sich bildenden Kugelwellen überlagern sich konstruktiv zu einer Wellenfront, welche um den Winkel $90^\circ - \vartheta_c$ gegenüber der Teilchenbahn geneigt ist, wobei ϑ_c der sogenannte Cherenkov-Winkel ist. In

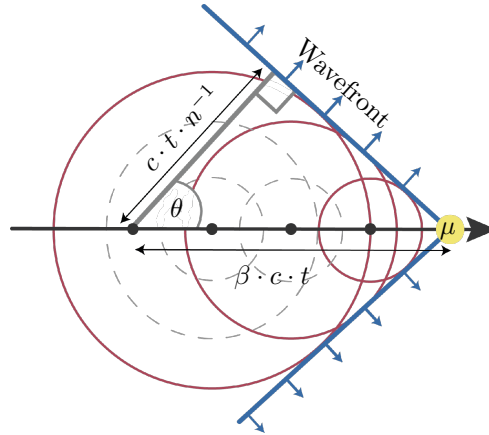


Abbildung 2.1: Schematische Skizze eines Myons μ beim Durchqueren eines Dielektrikums und der dabei emittierten Cherenkov-Strahlung (in blau dargestellt). Entnommen aus [11].

einem Zeitintervall t legt die Kugelwelle die Strecke $(c_0/n) \cdot t$ und das geladene Teilchen die Distanz $v_c \cdot t = \beta \cdot c_0 \cdot t$ zurück, wobei β die Teilchengeschwindigkeit relativ zur Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Die Flugbahn eines Myons, das in diesem Beispiel das geladene Teilchen darstellt und die dabei emittierte Cherenkov-Strahlung sind in Abb. 2.1 schematisch dargestellt. Aus einfachen trigonometrischen Überlegungen ergibt sich die Cherenkov-Gleichung

$$\cos \vartheta_c = \frac{\frac{c_0}{n} t}{\beta c_0 t} = \frac{1}{\beta n}, \quad (2.3)$$

aus der der Öffnungswinkel des in drei Dimensionen entstehenden Cherenkov-Kegel bestimmt werden kann. Dabei hängt $n = n(\lambda)$ von der Wellenlänge λ der emittierten Cherenkov-Strahlung ab. Der Cherenkov-Kegel ist vergleichbar mit dem Mach'schen Schallkegel, der beim Überschallflug entsteht.

Das Emissionsspektrum des Cherenkov-Lichts ist näherungsweise über die Frank-Tamm-Formel [12]

$$\frac{d^2 N_\gamma}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n(\lambda)^2}\right) \quad (2.4)$$

gegeben, wobei N_γ die Anzahl emittierter Photonen und dx ein infinitesimaler Abschnitt der Wegstrecke des geladenen Teilchens ist. $\alpha \approx 1/137$ ist die Feinstrukturkonstante. Bei näherungsweise konstantem Brechungsindex ist die Spektralverteilung der Cherenkov-Strahlung also proportional zu λ^{-2} .

3 IceCube Neutrino-Observatorium

Das IceCube Neutrino-Observatorium (kurz: IceCube) am geographischen Südpol ist das derzeit größte Neutrino-Teleskop weltweit. Das Detektionsvolumen umfasst 1 km^3 antarktischen Gletschereises. Streuen hochenergetische Neutrinos an den Nukleonen der Wassermoleküle, kann, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, Cherenkov-Licht von Sekundärteilchen emittiert werden. Über digitale optische Module (engl. *digital optical module*, *DOM*) wird dieses Licht detektiert, wodurch auf Richtung und Energie des zugrunde liegenden Neutrinos geschlossen werden kann. Der Detektoraufbau von IceCube ist in Abb. 3.1 dargestellt. Die optischen Module sind in 86 Strängen einer Länge von jeweils 1 km angeordnet [14]. Insgesamt befinden sich 5160 DOMs in einer Tiefe von 1450 m - 2450 m. Ein optisches Modul besteht aus einer Glaskugel mit einem Durchmesser von 13 Zoll. Darin enthalten ist neben einem Photomultiplier mit einem Kathodendurchmesser von 10 Zoll auch digitale Ausleseelektronik zur Verarbeitung gemessener Signale. Die Halbkugel des Moduls, die den PMT enthält, ist nach unten ausgerichtet. Somit schirmt die Erde Hintergrundrauschen ab, das durch atmosphärische Myonen entsteht. Das Spektrum der mit IceCube messbaren Neutrinos erstreckt sich von einigen 10 GeV bis in den PeV-Bereich.

Die in IceCube verwendeten optischen Module detektieren Cherenkov-Strahlung mit Hilfe von Photoelektronenvervielfachern (engl. *photomultiplier tube*, *PMT*). PMTs sind Sensoren, die einfallende Photonen in einen messbaren Spannungspuls umwandeln und so bereits auf einzelne Photonen sensitiv sind.

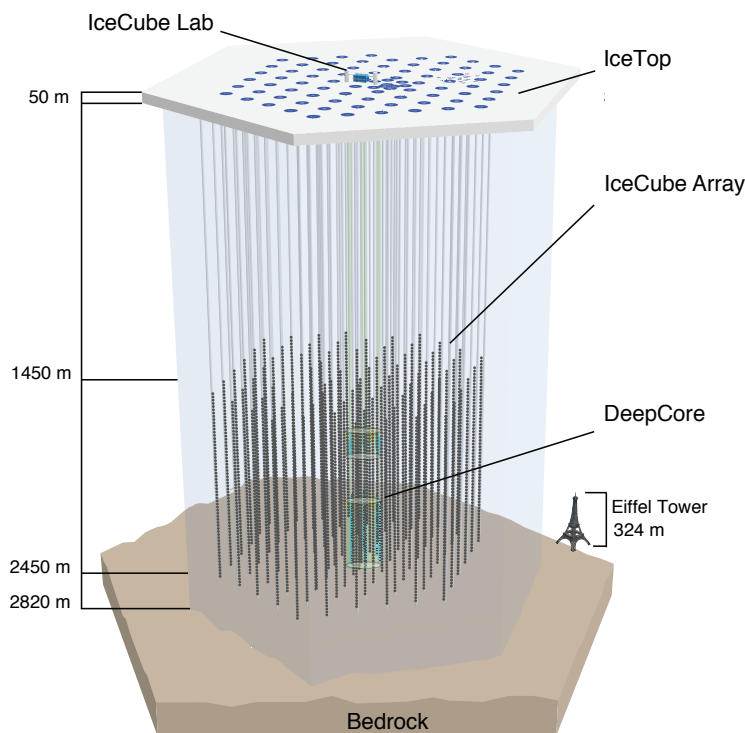


Abbildung 3.1: Schematische Aufbauskinne des IceCube Neutrino-Observatoriums am Südpol. Entnommen aus [13].

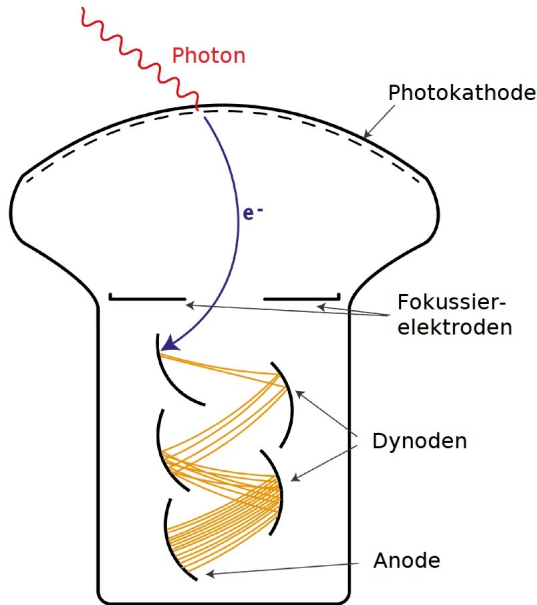


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers. Das primäre Photoelektron ist in blau dargestellt, gelbe Linien repräsentieren Sekundärelektronen. Entnommen aus [11].

Die schematische Skizze eines PMTs ist in Abb. 3.2 dargestellt. Treffen Photonen auf die Photokathode eines PMTs, lösen sie durch den photoelektrischen Effekt Photoelektronen heraus. Diese werden anschließend fokussiert und durch eine angelegte Spannung in Richtung eines Dynodensystems beschleunigt. Der Innenraum eines PMT ist evakuiert, sodass sich freie Elektronen ungehindert fortbewegen können. Elektronen, die auf eine Dynode treffen, schlagen Sekundärelektronen aus ihr heraus. Diese werden anschließend weiter bis zur nächsten Dynode beschleunigt. Die Anzahl freier Elektronen steigt also exponentiell mit der Anzahl der Dynoden. An der Anode werden alle dort eintreffenden Elektronen über einen Widerstand abgeführt. Gemessen wird ein Spannungspuls, dessen Amplitude proportional zur Anzahl der an der Photokathode einfallenden Photonen ist [11].

3.1 Rekonstruktion von Ereignissen

Ereignisse einer Neutrino-Wechselwirkung die in IceCube gemessen werden, verursachen, je nach Sorte des ursprünglichen Neutrinos, unterschiedliche Signaturen im Detektor. Diese unterscheiden sich in den Positionen der DOMs, die Cherenkov-Licht detektieren, sowie der Ankunftszeit und Anzahl der gemessenen Photonen. Durchquert ein (Anti-)Myon aus der tiefinelastischen Streuung eines μ -(Anti-)Neutrinos den Detektor, hinterlässt die resultierende Cherenkov-Strahlung, wie in Abb. 3.3 (rechts) dargestellt, eine Spur (engl. *track*) getroffener DOMs [15]. Aus dieser Spur lässt sich die Trajektorie des geladenen Leptons und damit auch die Richtung des ursprünglichen Neutrinos rekonstruieren. Myon-Neutrinos können also auf Quellen der Neutrinos weisen. Die Winkelauflösung ist in diesem Fall $< 0,5^\circ$ [16]. Da die Flugbahn des Myons oft nicht vollständig im Detektorvolumen enthalten ist, lässt sich für die Energie des Myon-Neutrinos jedoch kein exakter Wert bestimmen, sondern lediglich eine Untergrenze.

Elektromagnetische bzw. hadronische Schauer (engl. *shower*) können durch ein im geladenen Strom entstandenes Elektron oder Positron (vgl. Gleichung (2.1)) oder durch eine beim neutralen Strom induzierte hadronische Kaskade (vgl. Gleichung (2.2)) entstehen. Dieser Fall zeichnet sich durch das in Abb. 3.3 (links) gezeigte fast sphärische Muster getroffener DOMs aus. Da die geladenen Teilchen ihre Energie über eine relativ kurze Strecke im Detektormedium deponieren, kann aus solch einer Signatur oft die Energie des Neutrinos rekonstruiert werden. Wegen der nahezu kugelförmigen Charakteristik können jedoch nur relativ unpräzise Aussagen mit einer Winkelauflösung von 10° [16] über die Richtung des ursprünglichen Neutrinos getroffen werden.

Die durch den Betrieb eines optischen Moduls in IceCube erhaltenen Rohdaten sind von PMTs gemessene Spannungspulse, aus denen die Anzahl registrierter Photonen und der Zeitpunkt der Detektion bestimmt werden können [17]. Die weiteren relevanten Messgrößen

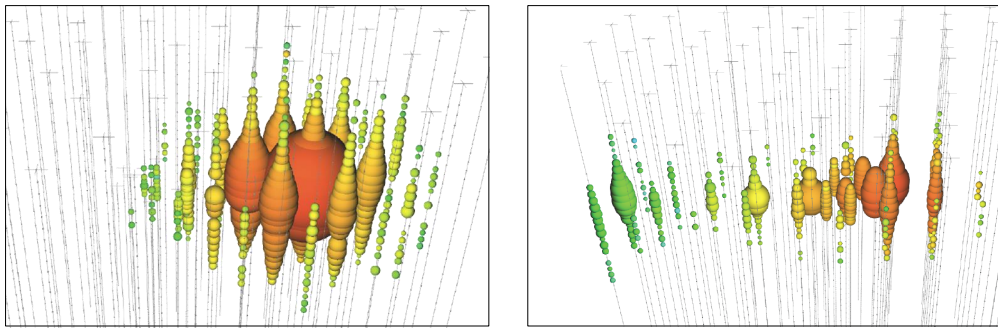


Abbildung 3.3: Im Detektor deponiertes Licht nach dem Muster eines Kaskaden- (**links**) bzw. Spur-Ereignis (**rechts**). Das Licht wird im Detektor von optischen Modulen detektiert. Jede Kugel im Bild repräsentiert ein Modul, wobei die Größe der Kugel für die Anzahl detektierter Photonen steht. Die Farbe der Kugeln stellen den Zeitpunkt der Detektion (blau: früh, rot: spät) dar. Entnommen aus <https://goo.gl/jXorcb>.

(Neutrino-Sorte, -Energie, -Richtung) werden aus den Messdaten aller Module rekonstruiert. Die Anzahl der von den Modulen gemessenen Photonen weicht durch verschiedene Verlustfaktoren von der Anzahl emittierter Cherenkov-Photonen ab. Ein Teil der Photonen verfehlt die Module des Detektors oder wird vom Eis absorbiert. Eine weitere wichtige Verlustquelle stellt die Quanteneffizienz der PMTs dar, die die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon an der Photokathode ein Photoelektron herauslöst, angibt. Auch die Aufhängung der Module (dazu mehr in Abschnitt 3.3) schirmt Photonen ab. Weiterhin muss die Richtungsänderung von Photonen z.B. durch Streuung im Eis oder Reflexion an der Modulaufhängung bei Datenanalysen berücksichtigt werden. Die Untersuchung dieser Detektoreigenschaften ermöglicht eine genauere Rekonstruktion der oben genannten Größen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss der Modulaufhängung auf die Photon-Sensitivität des mDOM-Sensors, der in Abschnitt 3.3 beschrieben wird.

3.2 IceCube-Erweiterungen

Der Bau des IceCube Neutrino-Teleskops wurde 2010 abgeschlossen. Derzeit laufen Planungen für zukünftige Erweiterungen, die einen größeren Energiebereich zugänglich machen sollen. Im Rahmen von IceCube-Gen2 soll dazu das Detektionsvolumen von 1 km^3 auf $7,9 \text{ km}^3$ ausgebaut werden [18]. Davor ist zunächst der Bau des IceCube Upgrade für den antarktischen Sommer 2022/23 geplant. Das Upgrade umfasst 7 neue Stränge optischer Module, die in Tiefen zwischen 2150 m und 2425 m installiert werden [19]. Diese erweitern den Bereich der DeepCore-Sektion. Durch eine besonders dichte Ausstattung an Modulen (20 m horizontale und 3 m vertikale Distanz zwischen Modulen) können durch das Upgrade Neutrinoenergien im einstelligen GeV-Bereich für IceCube erschlossen werden. Dadurch wird zum Beispiel eine höhere Sensitivität auf die Messung von Neutrinooszillations-Parametern erreicht.

3.3 Das multi-PMT digital optical module

Wie in Kapitel 3 bereits erwähnt, werden in IceCube optische Module mit einem einzigen 10 Zoll-PMT verwendet. Für Erweiterungen des IceCube Neutrino-Teleskops werden derzeit weitere Module entwickelt. Das multi-PMT digital optical module (kurz: mDOM) kommt

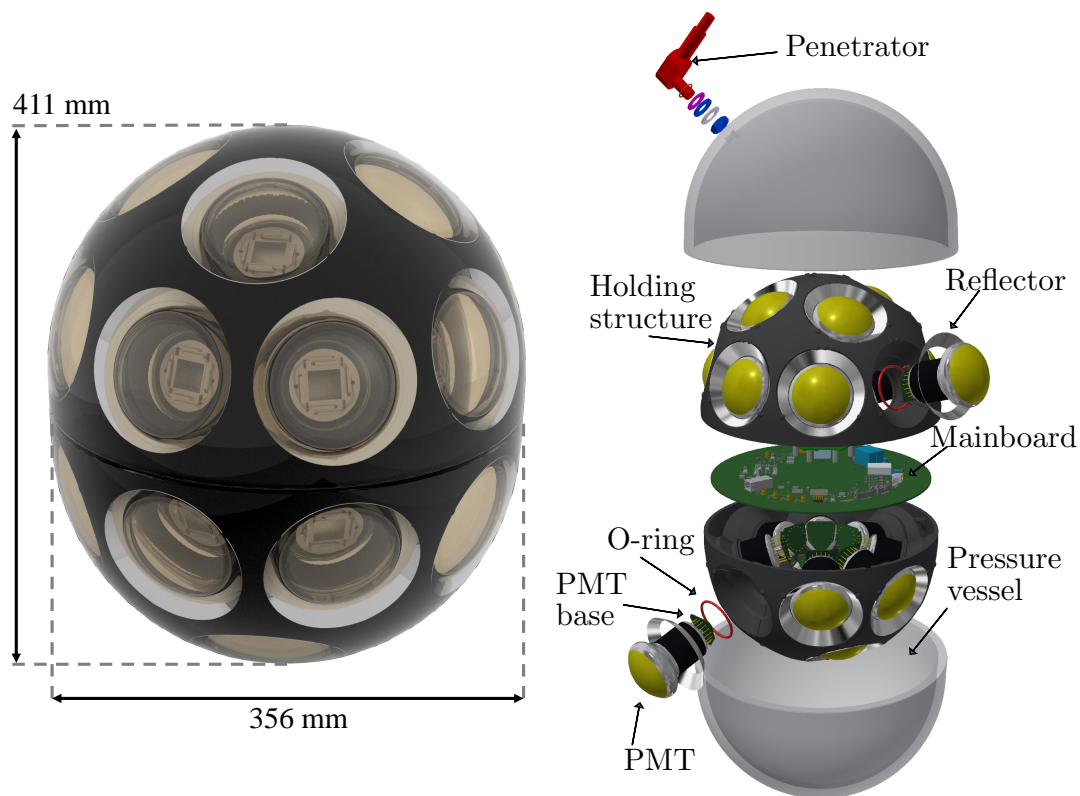


Abbildung 3.4: Ansichten des mDOM-Sensors. **Links:** Darstellung des geschlossenen Moduls. **Rechts:** Künstlerische Explosionsdarstellung des mDOM und seiner Hauptbestandteile (ohne Gel). Quelle beider Bilder: IceCube-Gruppe Münster.

im IceCube Upgrade zum Einsatz. Es beinhaltet 24 Photomultiplier mit 80 mm Kathodendurchmesser, die in alle Richtungen ausgerichtet sind. Ein entscheidender Vorteil dieses Designs ist die insgesamt mehr als verdoppelte photosensitive Fläche [20]. Außerdem deckt die photosensitive Fläche des mDOM den gesamten Raumwinkel mit nahezu isotroper Winkelakzeptanz ab, da die PMTs gleichmäßig auf das ganze Modul verteilt liegen. Da jeder Photomultiplier einzeln ausgelesen wird, verfügt das Modul dazu über eine intrinsische Richtungssensitivität, die die Winkelauflösung des gesamten Detektors verbessern kann.

Als äußere Hülle besitzt das mDOM einen Druckbehälter aus Borosilikatglas. Dieser besteht aus zwei identischen Hemisphären, die jeweils in einen kurzen konischen Teil übergehen. Die 24 PMTs sind in eine Polyamid-Haltestruktur eingebettet. Zur Erhöhung der sensitiven Fläche des Moduls sind kegelförmige Reflektoren aus Aluminium um die Photokathoden aller PMTs angebracht. Eine Gelschicht zwischen dem Druckbehälter und den inneren Komponenten des Moduls fungiert als optischer Koppler. Die Ausleseelektronik befindet sich in der Mitte des Moduls, innerhalb der Haltestruktur. Die Daten, die von den PMTs aufgenommen werden, werden durch ein Anschlusskabel (auch *PCA*, *penetrator cable assembly*), das von der Hauptplatine durch eine Öffnung im Druckbehälter zum Hauptdatenkabel verläuft, abgeführt. Das Hauptkabel wird mit dem Strang ins Eis gelassen und verläuft entlang aller Module.

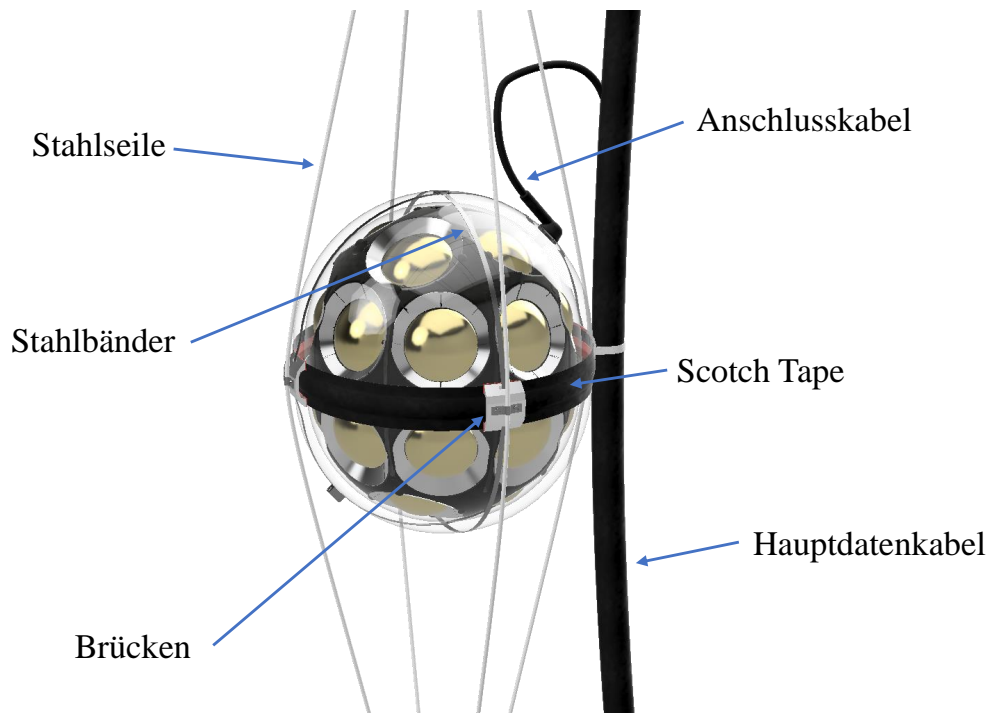


Abbildung 3.5: Das mDOM und die Hauptbestandteile seiner Aufhängung. Bereitgestellt von Anna Pollmann.

Aufhängung des mDOM

Für den Aufbau eines Modulstrangs im Eis wird zunächst mit einem Hochdruckstrahl heißen Wassers ein Loch in die Eisdecke gebohrt. Dieses wird anschließend mit Wasser gefüllt, bevor der Modulstrang eingelassen wird. Optische Module in IceCube verfügen daher über eine Aufhängung, die sie während des Einsetzvorgangs und vor dem Einfrieren des Wassers an der korrekten Stelle hält. Neben ihrer Hauptaufgabe, die Module im Strang zu positionieren, muss die Aufhängung weitere Voraussetzungen erfüllen. Sie muss in der Lage sein, das gesamte Gewicht eines Modulstrangs (850 kg) zu tragen [21]. Darüber hinaus müssen alle Komponenten der Modulaufhängung einem Druck von bis zu 700 bar und gleichzeitig Temperaturen zwischen 50 °C und –40 °C standhalten. Zusätzlich kann bei der Montage der Stränge ein Kälteschock durch Temperaturänderungen von 20 °C auf –40 °C auftreten. Neben diesen Bedingungen soll die Aufhängung einen möglichst geringen Anteil der photosensitiven Fläche des Moduls verdecken.

Die Modulaufhängung des mDOM Sensors unterscheidet sich im Wesentlichen durch die Befestigung der Seile am Modul von der Aufhängung des in der ersten Generation von IceCube verwendeten DOM. Bislang bestand die Halterung aus einer Metallschiene, die um den Äquator des Moduls verläuft. In ihr können Stahlseile befestigt werden, die als Aufhängung des Moduls im Strang dienen. Da das mDOM über einen konischen Part in dieser Region verfügt, der sich unter Einfluss des im Eis herrschenden hohen Drucks leicht zusammenzieht, wird derzeit eine Variante ohne Metallschiene bevorzugt. Der hohe Druck im Eis entsteht dadurch, dass das Wasser in den Bohrlöchern von oben nach unten zufriert, da an der Eisoberfläche geringere Temperaturen herrschen als im Eis. Durch den Verzicht auf den relativ breiten Gürtel wird außerdem weniger photosensitive Fläche des Moduls verdeckt. Nach aktuellem Stand umfasst das Design folgende Komponenten (illustriert in Abb. 3.5):

Seile Das mDOM hängt an 2 m langen Seilen aus Edelstahl. Diese werden außen über sogenannte Brücken am Modul entlang geführt und an ihren Enden oben und unten jeweils

in einen Bügel eingehängt. Eine Variante mit vier Seilen wird derzeit bevorzugt.

Brücken Um den Abstand zwischen den Seilen und dem Glasbehälter des Moduls sicherzustellen, werden vier Brücken aus Aluminium am Gehäuse des mDOM auf Höhe des Moduläquators befestigt. Eine der Stahlseile läuft jeweils über eine Kerbe an der Oberseite der Brücke und wird durch einen Blechstreifen befestigt, der in der Brücke festgeschraubt wird. Zwei schmale Gummiplatten dienen dem Schutz des Druckbehälters vor den Kanten der Brücke.

Vertikale Stahlbänder Zwei Streifen aus Edelstahl laufen, um 90° gegeneinander versetzt, um das Gehäuse des Moduls und befestigen die Brücken. Dazu werden sie durch Öffnungen in den Brücken geführt. Rohrschellen spannen die Bänder um das Modul fest. An einem der Bänder befindet sich eine ovale Aussparung. An dieser Stelle dringt das Verbindungskabel zwischen Modul und Hauptdatenkabel in das Glasgehäuse ein. Am Südpol des Moduls sind beide Bänder zusammengeschweißt, am Nordpol hingegen sind sie durch einen Ring verbunden.

Äquatorring Die Schnittstelle, an der sich beide Hälften des Druckbehälters treffen wird von knetmassenartigem Tera-Tape abgedichtet. Zum Schutz der Abdichtung wird diese Stelle von einem flexiblen Scotch-Band überdeckt.

Ziel dieser Arbeit ist eine Simulation der Schlüsselkomponenten der Aufhängung des mDOM-Sensors in Geant4 zur Überprüfung des Einflusses der Bauteile auf die Photon-Sensitivität des Moduls.

4 Durchgeführte Simulationen

Der Einfluss der Modulaufhängung auf Messungen des mDOM wird mithilfe von Simulationen untersucht. In diesem Kapitel wird die dabei verwendete Simulationssoftware beschrieben und anschließend das Vorgehen bei der Modellierung der Aufhängung erläutert.

4.1 Geant4

Die C++-basierte Software “Geant4” (**Geometry and tracking**) dient der Simulation des Durchgangs von Teilchen durch Materie und den dabei auftretenden Wechselwirkungen. Sie arbeitet auf Basis von Monte-Carlo-Methoden und umfasst die Nachverfolgung von Teilchenbahnen, die Konstruktion von geometrischen Objekten und eine Vielfalt physikalischer Modelle, die einen Großteil der bekannten Wechselwirkungen und einen weiten Energiebereich abdecken. Das Programm ermöglicht auch die Visualisierung der simulierten Geometrien und physikalischen Prozesse [22]. Die Software wurde am CERN entwickelt und ist frei zugänglich. Ihr Anwendungsbereich umfasst verschiedene Bereiche von der Hochenergie- und Beschleunigerphysik über astrophysikalische Probleme bis hin zur medizinischen Physik.

4.1.1 Konstruktion geometrischer Objekte

Geometrische Objekte werden in Geant4 nach einem 3-Schritte-Prinzip erstellt. Jeder der folgenden Schritte repräsentiert eine Klasse in Geant4. Diese formen das Objekt und weisen ihm alle notwendigen Eigenschaften zu.

G4Solid Hier wird die Form und Dimension des Objekts festgelegt. Der Benutzer kann aus einer Reihe grundlegender geometrischer Figuren, wie zum Beispiel einem Quader, einem Zylinder oder einer Kugel auswählen [23]. Die Dimensionen des Objekts werden der Klasse als Parameter übergeben. Neben einzelnen der in Geant4 vorhandenen Objekten kann auch ein Boolescher Operator auf zwei G4Solid-Objekte angewandt werden, um die Vereinigung, Subtraktion oder das Schnittvolumen der beiden Körper zu erhalten.

G4LogicalVolume Der Klasse G4LogicalVolume wird das zuvor erstellte G4Solid übergeben; sie weist diesem Materialeigenschaften zu. Materialeigenschaften werden in Form einer G4Material-Klasse an das G4LogicalVolume übergeben. Diese enthält Informationen über die Zusammensetzung des Materials sowie makroskopische Eigenschaften wie Dichte, Temperatur oder Druck. Auch optische Eigenschaften des Objekts wie der Reflexionskoeffizient oder die Absorptionslänge können dem G4LogicalVolume zugewiesen werden.

G4PhysicalVolume Diese Klasse orientiert und platziert das Objekt im Raum. Dazu wird ihr das G4LogicalVolume übergeben. Die Position des Objekts wird anhand eines Vektors, die Rotation anhand einer Rotationsmatrix definiert. Das Koordinatensystem, das als Referenz dient, ist das sogenannte Muttervolumen. Jedes G4PhysicalVolume wird, vergleichbar mit den Schalen einer Zwiebel, in einem größeren Volumen platziert. Das Volumen, welches alle Objekte enthält, heißt Welt. Alle physikalischen Prozesse, die

simuliert werden, sind nur im Bereich der Welt definiert. Verlässt ein Teilchen die Welt, ist es in der Simulation nicht mehr vorhanden.

4.1.2 Physikalische Prozesse

Aus der gesamten Bandbreite in Geant4 vorhandener Interaktions-Arten und Teilchensorten kann der Benutzer in einer sogenannten *Physics List* die benötigten auswählen. Dies ermöglicht es, die auftretenden Wechselwirkungen und Teilchen auf die für die Simulation wesentlichen zu beschränken. Gleichzeitig können auch die Energiebereiche, in der einzelne Interaktionen stattfinden, eingegrenzt werden [4].

Die Auswertung physikalischer Prozesse in Geant4 erfolgt in mehreren hierarchisch angeordneten Stufen. Ein Durchlauf (in Geant4: *run*) kann aus mehreren Ereignissen (*events*) bestehen. In einem Ereignis sind die Informationen über den Pfad (*track*) aller Primär- und Sekundärteilchen (Letztere sind solche, die in Wechselwirkungen entstehen), die dem Ereignis angehören, enthalten. Ein Pfad beinhaltet Informationen über die Entwicklung eines einzelnen Teilchens. Dazu zählen zum Beispiel die Position und die Energie des Teilchens zu bestimmten Zeitpunkten. Die Schritte (*steps*), in denen die Informationsspeicherung erfolgt, stellen die unterste Ebene dar. Physikalische Prozesse, zu denen alle Arten von Wechselwirkungen, Zerfällen oder Energieverlust zählen, werden in der Schritt-Ebene ausgewertet. Demnach wird an jedem Schritt auf Grundlage der in der *Physics List* enthaltenen Prozesse über die Zukunft des Teilchens entschieden. Die Schrittweite entspricht der kleinsten Wechselwirkungslänge aller angewandten Prozesse. Bei optischen Photonen enden Schritte stets an optischen Übergängen, wobei Phänomene wie Brechung, Reflexion und Streuung realisiert werden. Der Detailreichtum der Simulationen beansprucht Rechenzeit, weshalb Geant4 oft in Verbindung mit Hochleistungsrechnern verwendet wird.

4.2 Erweiterung des Geant4-Modells des mDOM um die Modulaufhängung

Alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen basieren auf einem bereits existierenden mDOM-Modell von Lew Classen, Alexander Kappes und Björn Herold, das in Geant4 implementiert ist. Mit diesem Modell wurden unter anderem bereits Studien zu den optischen Eigenschaften des Moduls [4], dem Untergrund durch radioaktive Kernzerfälle [24] sowie Kalibrationsmethoden [25] durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Einfluss der Aufhängung des mDOM auf seine Akzeptanz untersucht werden. Im Folgenden werden die Bestandteile des mDOM-Modells und die Funktionen des verwendeten Geant4-Programms erläutert. Anschließend wird das Vorgehen zur Modellierung der Modulaufhängung erklärt.

4.2.1 mDOM-Modell in Geant4

Das Modell des mDOM enthält den Druckbehälter, die Gelschicht, die Haltestruktur, die Reflektoren und die äußeren Komponenten der PMTs. Die Ausleseelektronik innerhalb des Moduls sowie die inneren Komponenten der PMTs sind nicht enthalten, da sie für die Simulation mit von außen einfallenden Photonen nicht von Bedeutung sind. In Abb. 4.1 ist das in Geant4 konstruierte Modell des mDOM dargestellt. Die den einzelnen Bestandteilen zugewiesenen Materialien entsprechen den tatsächlich verwendeten. Bei Komponenten, bei denen der Auswahlprozess noch nicht abgeschlossen ist, stellt das Modell eine Auswahl verschiedener Varianten der betreffenden Komponente bereit, auf die über die Kommandozeile zugegriffen werden kann. Darüber hinaus können über das Terminal auch weitere Eigenschaften der Simulation eingestellt werden, wie zum Beispiel das Medium der Umgebung

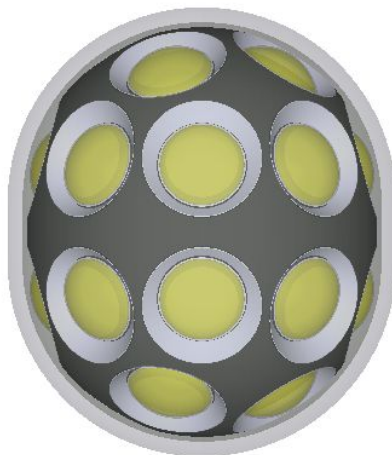


Abbildung 4.1: Modell des mDOM in Geant4. Alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen basieren auf diesem Detektoraufbau.

des Moduls.

Eine Reihe physikalischer Prozesse sind in der verwendeten Simulation über die *Physics List* definiert. Für die im Rahmen dieser Arbeit modellierten Komponenten der Aufhängung sind besonders Prozesse der Art *G4OpBoundaryProcess* von Bedeutung. Damit gemeint sind alle Vorgänge, die für optische Photonen an Grenzflächen infrage kommen, wie Reflexion, Absorption oder Brechung.

Simulationen können je nach zu untersuchender Eigenschaft des Moduls mit drei verschiedenen Unterprogrammen durchgeführt werden. Das in dieser Arbeit verwendete Programm *mdom_scanAngular* bietet die Möglichkeit, auf das Modul einfallende Photonen zu simulieren. Ein Photonenstrahl, der auf das Zentrum des Moduls ausgerichtet ist, wird von einer kreisförmigen Fläche emittiert. So wird der Einfall einer ebenen Welle auf das Modul simuliert. Der Durchmesser der Emitter-Scheibe sowie die Anzahl und Wellenlänge emittierter Photonen können per Kommandozeile übergeben werden. Trifft ein Photon auf die Photokathode eines PMTs, wird es aus der Simulation entfernt und als Treffer (engl. *hit*) gespeichert¹. Als Ergebnis einer Simulation werden vom Programm die Anzahl der Treffer auf das gesamte Modul sowie die Trefferanzahlen der einzelnen PMTs ausgegeben. Diese Simulation wird für Einfallswinkel über den gesamten Raumwinkel durchgeführt. Dadurch ergibt sich die Winkelakzeptanz des Moduls, eine Verteilung der Trefferanzahlen für verschiedene Einfallswinkel. Durch Untersuchung der Winkelakzeptanz des Moduls unter Einbezug der modellierten Komponenten der Aufhängung kann der Einfluss dieser Bauteile auf die Photon-Sensitivität des Moduls geprüft werden.

4.2.2 Modulaufhängung in Geant4

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen bei der Modellierung der einzelnen Bauteile der Modulaufhängung in Geant4 erläutert. Alle im Rahmen dieser Arbeit konstruierten Komponenten (auch das Hauptdatenkabel und das PCA-Kabel) werden im Folgenden unter dem Begriff

¹Die Quanteneffizienz der PMTs kann im Modell berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Simulationen jedoch ohne Quanteneffizienz durchgeführt.

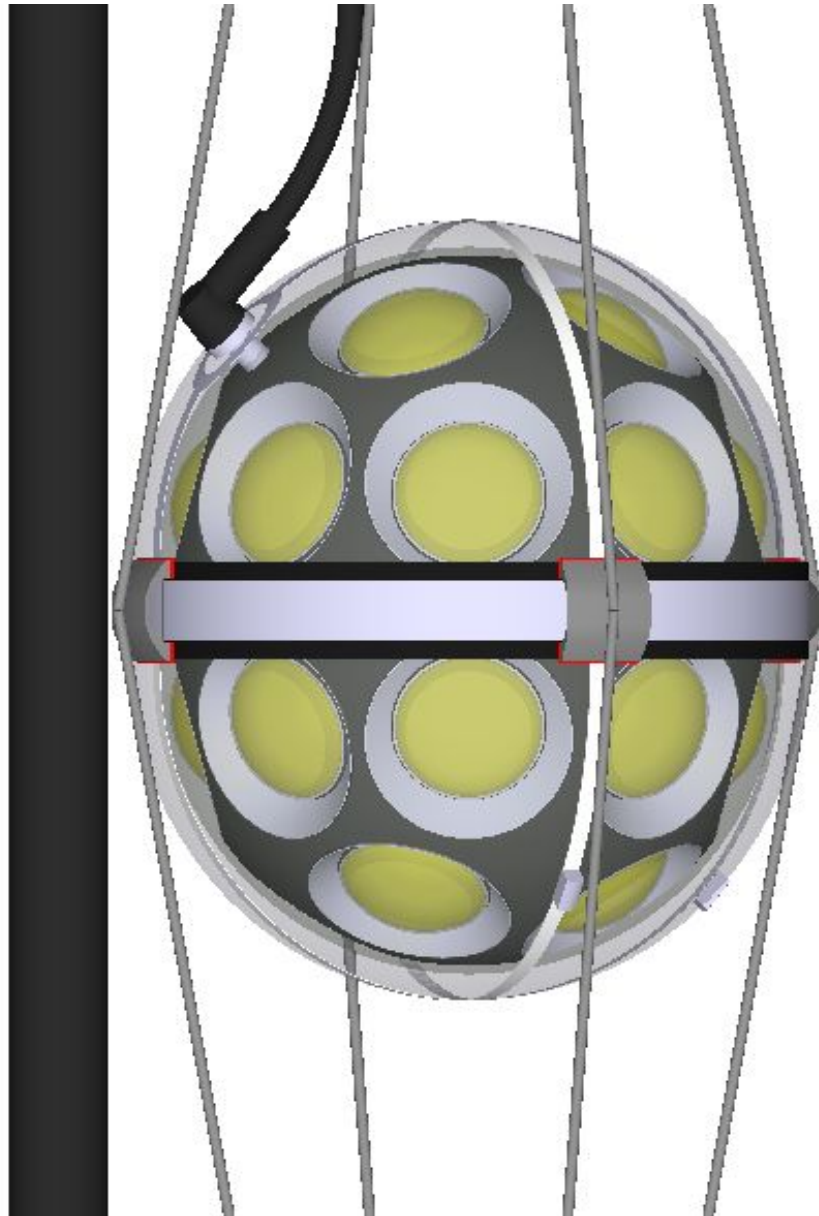


Abbildung 4.2: Darstellung des mDOM-Modells in Geant4 mit allen Komponenten der Aufhängung. Die Seile laufen oben und unten zusammen, das PCA-Kabel endet an einem der Seile (siehe Abb. 4.3).

“Aufhängung” zusammengefasst. Die bei der Modellierung verwendeten Maße der Komponenten entsprechen zu großen Teilen den Konstruktionszeichnungen der Modulaufhängung (für die Konstruktionszeichnungen siehe Anhang A.3). Für die Entwicklung der Modulaufhängung des mDOM (mit Ausnahme des PCA und des Hauptdatenkabels) ist die IceCube-Gruppe der Universität Wuppertal verantwortlich.

Die Brücken werden in Form sogenannter *G4Polycones* realisiert. Dabei handelt es sich um beliebig viele übereinander geschichtete Kegel, wobei die Position jeder Schicht auf der z -Achse sowie ihr innerer und äußerer Radius der Klasse übergeben werden. Die Seile, an denen das Modul aufgehängt ist, werden anhand von Vollzylindern modelliert. Die natürlich auftretende Biegung des Seils in der Nähe der Befestigungsstellen wird dabei vernachlässigt. Der Neigungswinkel α , der die Rotation der Kabel um die x -Achse angibt, kann mit der Beziehung $\cos \alpha = 2r/l$ bestimmt werden. Dabei entspricht r dem Abstand der Stelle, an der das Kabel auf der Brücke aufliegt, zum Ursprung und l ist die Länge des Seils. Im Modell

besteht jedes Seil aus zwei an der Äquatorialebene gespiegelten Zylindern. Die Anzahl der Brücken und Seile kann als Parameter in der Kommandozeile an das Programm übergeben werden, wodurch neben den im derzeitigen Design vorgesehenen vier Seilen auch ein Drei-Seil-Aufbau untersucht werden kann.

Das Scotch-Tape ist in Form eines Hohlzylinders der Höhe 50 mm implementiert. Der Innenradius entspricht dabei dem Außenradius des zylindrischen Teils des Druckbehälters. Nach dem gleichen Prinzip ist das Edelstahlband, das außen am Scotch-Tape anliegt, konstruiert.

Die vertikalen Stahlbänder, die außen um das Modul laufen, sind als halbe Hohlzylinder mit einem Innenradius, der dem Außenradius des sphärischen Teils des Glasbehälters entspricht, konstruiert. An der Stelle, an der das Verbindungskabel (engl. *penetrator cable assembly*, PCA) in das Glasgehäuse eindringt, ist eines der Stahlbänder unterbrochen, was durch Subtraktion eines kürzeren Bandes realisiert ist. Für den ovalen Ring, der die Eindringstelle des PCA säumt, wird ein elliptischer Hohlzylinder, dessen Halbachsen denen des Ovals entsprechen, und eine dünne Kugelschale, deren Stärke der Dicke des Ringes entspricht, verwendet. Die Schnittmenge beider Figuren stellt den ovalen Ring dar. Das gleiche Vorgehen wird zur Modellierung des ebenfalls ovalen Ringes gewählt, der die Stahlbänder am Nordpol des Moduls verbindet.

Der Eindringkörper (engl. *penetrator*) des PCA besteht im Modell aus einem ~ 8 mm dicken Vollzylinder, der die Schraube des Penetrators darstellt, sowie einem daran anschließenden Kopf, welcher einen zylindrischen und einen kegelförmig zulaufenden Part besitzt. An den Kopf des Penetrators schließt das Verbindungskabel zwischen Modul und Hauptdatenkabel an. Für die Positionierung der Bestandteile des Penetrators ist die Verwendung von Kugelkoordinaten nützlich, da so die nahezu kugelförmige Geometrie des mDOM ausgenutzt werden kann.² Mit Hilfe der Einheitsvektoren \vec{e}_r , \vec{e}_ϑ und \vec{e}_φ können Verschiebungen der Komponenten in radialer, polarer bzw. azimuthaler Richtung realisiert werden.

Das PCA-Kabel ist in Form zweier torusförmiger Abschnitte, an die ein zylindrischer Teil anschließt, konstruiert. Als Rahmenbedingungen für die Konstruktion sind die Länge l des gesamten Kabels, der minimale Biegeradius R und die Forderung, dass das Kabel am Seil anschließt, vorgegeben. Eine Ansicht des PCA-Kabels im Modell nach aktuellem Stand ist in Abb. 4.3 dargestellt. Zunächst wird der Fall betrachtet, dass das PCA-Kabel an das Hauptdatenkabel anstelle des Seils anschließt, sodass $\delta = 0$. In diesem Fall ergeben sich aus trigonometrischen Betrachtungen die Bedingungen

$$\text{I)} \quad \alpha - \beta + \gamma = 90^\circ \quad (4.1)$$

$$\text{II)} \quad d = R (\cos(\beta) - 1 + \sin(\alpha + \gamma) - \sin(\alpha)) \quad (4.2)$$

für die Winkel β und γ . Dabei ist d die Distanz vom Anfang des ersten Torus zum Hauptdatenkabel, orthogonal zum Hauptdatenkabel. Der Winkel $\alpha = 49^\circ$ ist durch das Design des Moduls vorgegeben, wobei im Rahmen dieser Arbeit auch eine Variante mit $\alpha = 43^\circ$ untersucht wurde. Aus Gleichungen (4.1) und (4.2) ergibt sich

$$\beta = \arccos \left(\frac{1}{2} \left(\frac{d}{R} + \sin(\alpha) + 1 \right) \right). \quad (4.3)$$

Damit β reell ist, muss $d/R \leq 1 - \sin \alpha$ erfüllt sein. Für $\alpha = 49^\circ$ gilt $1 - \sin \alpha \approx 0,25$. Der Biegeradius muss somit mindestens viermal so groß sein wie der Abstand, der von den Tori überwunden wird. Diese Bedingung ist rein mathematischer Natur. Aus physikalischer Sicht könnte das Kabel natürlich jeden beliebigen Radius annehmen, der größer als der minimale Biegeradius ist. Aus β kann mit Gleichung (4.1) der Winkel γ und über die Gesamtlänge des Kabels somit die Länge des zylindrischen Teils bestimmt werden.

²Für alle Verschiebungen in z -Richtung muss die Höhe des konischen Parts des Moduls berücksichtigt werden.

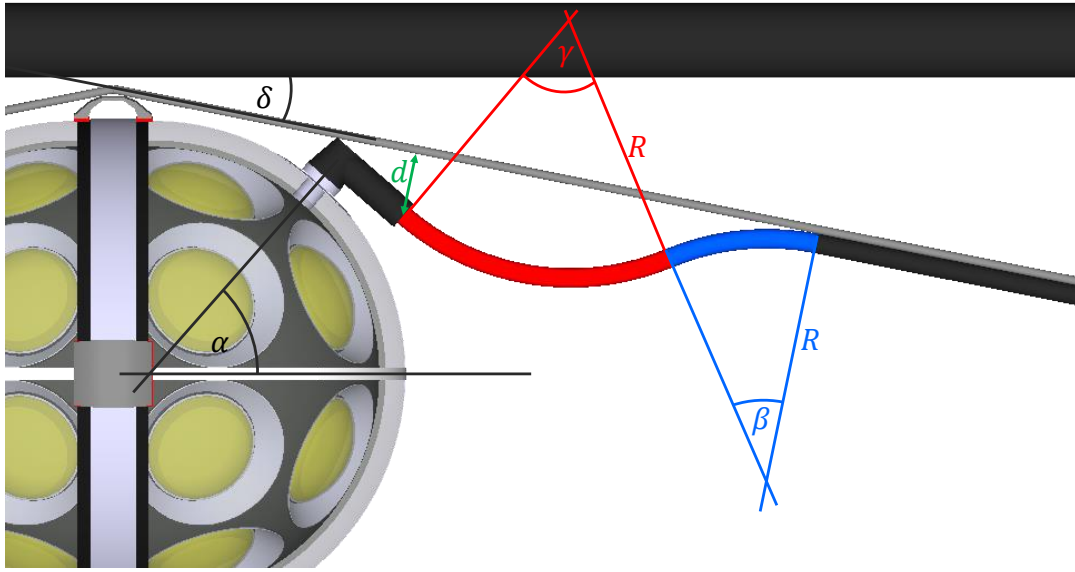


Abbildung 4.3: Konstruktionsskizze des PCA-Kabels in Geant4. Das PCA-Kabel ist aus zwei zylindrischen Teilen an den Enden und zwei torusförmigen Abschnitten in der Mitte aufgebaut. In dieser Darstellung wurden einige der Seile aus Gründen der Übersichtlichkeit ausgeblendet.

Um das PCA-Kabel an das Seil anstelle des Hauptdatenkabels anschließen zu lassen, werden die oben aufgestellten Bedingungen durch Drehung des Koordinatensystems um den Winkel δ transformiert. Es ergeben sich

$$\alpha' = \alpha + \delta \quad (4.4)$$

$$d' = d(1 - \sin \delta). \quad (4.5)$$

Mit diesen modifizierten Parametern α' und d' können die Winkel, die die beiden Tori jeweils abdecken, ebenfalls mit Gleichungen (4.1) und (4.3) ermittelt werden, sodass der zweite torusförmige Teil des Kabels an seinem Ende parallel zum Seil verläuft.

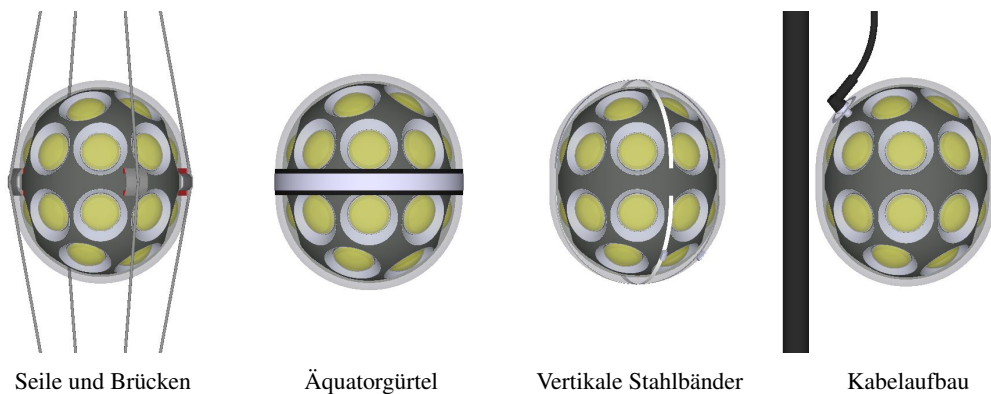


Abbildung 4.4: Darstellung der in der Simulation einzeln abrufbaren Konfigurationen der Aufhängung. Darüber hinaus stehen ein Aufbau mit allen Bestandteilen der Aufhängung (siehe Abb. 4.2) und ohne Aufhängung (Abb. 4.1) zur Verfügung.

Die einzelnen Komponenten, die im Rahmen dieser Arbeit konstruiert wurden, sind zu mehreren Gruppen zusammengefasst, die in Abb. 4.4 dargestellt sind. Über die Kommandozeile

kann dadurch auf einzelne Konfigurationen zugegriffen werden. So kann der Einfluss einzelner Komponenten(gruppen) auf Messungen des Moduls untersucht werden. Folgende Konfigurationen sind verfügbar:

- Sämtliche Komponenten des Modells
- Brücken und Seile
- Äquatorgürtel (Scotch Tape und das darüber liegende Stahlband)
- Vertikale Stahlbänder
- PCA und Hauptdatenkabel
- mDOM ohne Aufhängung

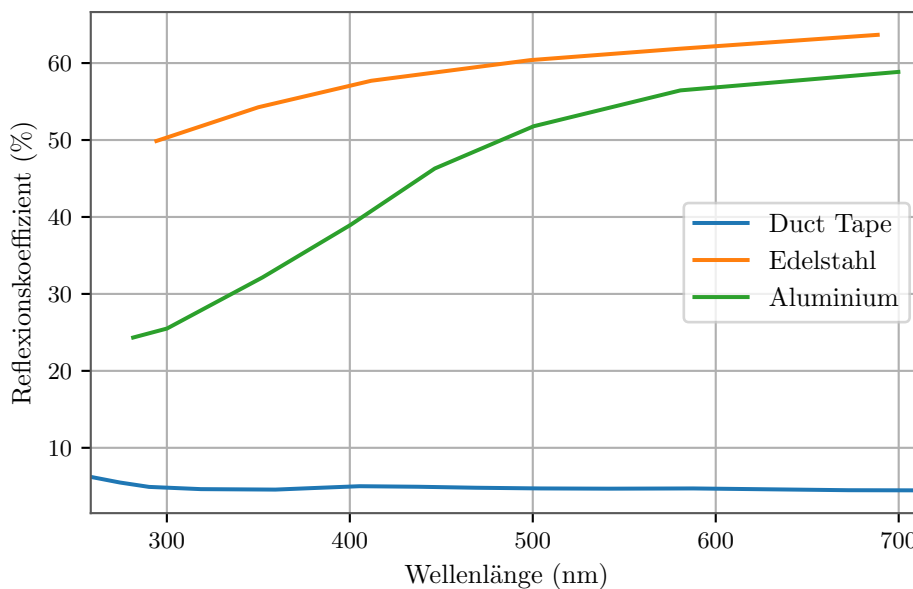


Abbildung 4.5: Reflexionskoeffizienten, die den einzelnen Komponenten der Aufhängung in Geant4 zugewiesen wurden. Die verwendeten Werte entstammen [26] (schwarzes Duct Tape), [27] (Edelstahl) und [28] (Aluminium-6061).

Die Reflexionskoeffizienten, die den einzelnen Bauteilen des Modells zugewiesen wurden, basieren auf Reflektivitätsspektren der für die Komponenten verwendeten Materialien. In Geant4 wird der Reflexionsgrad mit entsprechender Energie angegeben. Die bei optischen Photonen an Grenzflächen auftretenden Prozesse sind abhängig vom angrenzenden Medium. In Geant4 stehen Übergänge zwischen zwei dielektrischen Medien oder der Übergang Dielektrikum-Metall zur Auswahl. Letzterer ist für die Grenzflächen der im Rahmen dieser Arbeit implementierten Objekte von Bedeutung. Trifft ein Photon auf solch eine Grenzfläche, wird es entweder absorbiert oder reflektiert, wobei die Wahrscheinlichkeit einer Reflexion durch die Reflektivität gegeben ist. Das angewandte Reflexionsgesetz hängt von der Oberflächenbeschaffenheit des Materials ab. Der Benutzer kann zwischen einer rauen und einer polierten Oberfläche entscheiden. Bei einer polierten Oberfläche tritt gerichtete Reflexion auf, bei einer rauen Oberfläche können gerichtete Reflexion, Rückstreuung oder Lambert'sche (diffuse) Reflexion auftreten. Dem Scotch-Tape und den Kabeln sind aufgrund ihrer glänzenden Eigenschaften polierte Oberflächen zugewiesen. Für alle anderen Komponenten der

Aufhängung wird eine raue Oberfläche gewählt. Die verwendeten Reflexionskoeffizienten sind in Abb. 4.5 dargestellt. Für die Oberflächen des Scotch-Tape und der Kabel werden die Reflexionseigenschaften von schwarzem Duct-Tape verwendet. Bei allen anderen Komponenten wird die Reflektivität entsprechend dem Material zugewiesen.

5 Einfluss der Modulaufhängung auf die Photon-Sensitivität des mDOM

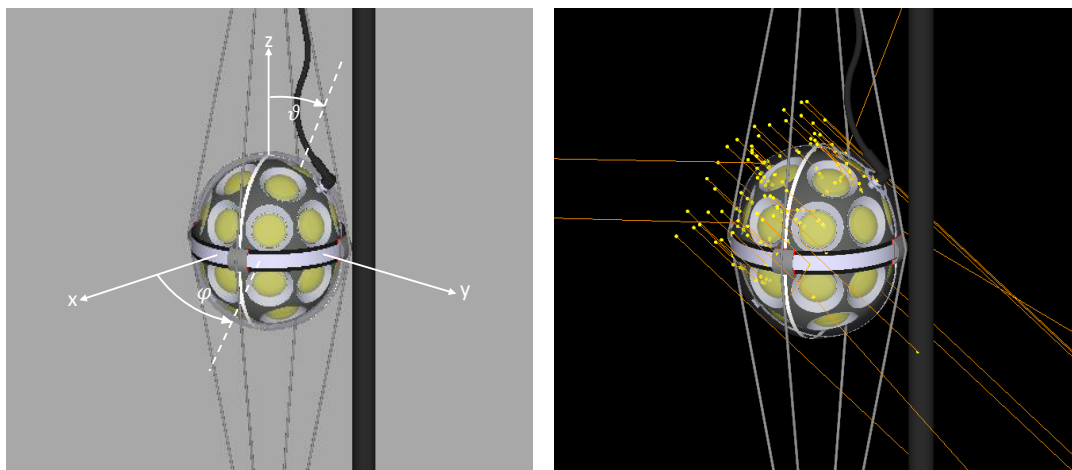


Abbildung 5.1: **Links:** Bezugssystem der durchgeführten Simulationen. Nach der in dieser Arbeit verwendeten Konvention verläuft ϑ von 0° (Nordpol des Moduls) bis 180° (Südpol). φ läuft von 0° bis 360° , wobei das Hauptdatenkabel bei $\varphi = 112,5^\circ$ positioniert ist. **Rechts:** Simulation 50 auf das Modul einfallender Photonen mit dem Einfallswinkel $\vartheta = 45^\circ$, $\varphi = 337,5^\circ$. Linien in orange stellen die Flugbahnen der Photonen dar, gelbe Punkte stehen für die Emission oder Wechselwirkung (Reflexion, Absorption etc.) von Photonen.

Um zu untersuchen, wie sich das konstruierte Modell der Modulaufhängung auf die Akzeptanz des mDOM auswirkt, werden Simulationen mit dem Geant4-Programm *mdom_scan-angular* durchgeführt, um eine Verteilung der Winkelakzeptanz des Moduls zu erhalten. Dazu werden Simulationen im Bereich des gesamten Raumwinkels durchgeführt, indem ϑ von 0° - 180° und φ von 0° - 360° variiert wird (vgl. Abb. 5.1 links). Die Schrittweite, mit der diese Simulationen durchgeführt werden, beträgt 1° . Aus jedem Winkel werden $3 \cdot 10^6$ Photonen mit der Wellenlänge $\lambda = 400 \text{ nm}$ ¹ in Richtung des Moduls emittiert. Der Photonenstrahl hat den Durchmesser $d = 210 \text{ mm}$ und wird aus $2,5 \text{ m}$ Entfernung emittiert, um mit der Simulation auch den Einfluss der längeren Komponenten der Aufhängung zu erfassen. Für die Umgebung des Moduls wird Eis (ohne Absorption) als Material gewählt. Bei allen variablen Komponenten des mDOM werden die Standardeinstellungen übernommen; die verwendeten PMTs sind somit vom Typ Hamamatsu R12199-02, außerdem wird WACKER SilGel® 612 A/B² als Gel und Druckbehälterglas von Vitrovex³ verwendet. Für die Reflektoren wird das Material Almeco V95⁴ und 45° als Öffnungswinkel eingestellt.

Aus den Simulationen wird für jeden Einfallswinkel der Photonen die Anzahl der Treffer aller PMTs des Moduls, sowie die individuellen Trefferanzahlen der einzelnen PMTs erhalten.

¹Um alle Ergebnisse vergleichen zu können, wird die Wellenlänge nicht variiert. Der Verlust an Photonen durch die Aufhängung ändert sich mit der Wellenlänge (siehe Abschnitt 5.6).

²<https://www.wacker.com/h/de-de/silikonkautschuk/silicongele/wacker-silgel-612-ab/p/000007546>

³<https://www.vitrovex.com/>

⁴https://www.almecogroup.com/uploads/generic_file/l101_eng_almeco_vega_2019_single.pdf

Aus dem Anteil der detektierten Photonen n_{det} an der Gesamtzahl emittierter Photonen n_{emit} sowie der Fläche A_{emit} des Photonemitters kann die effektive Fläche des Moduls bestimmt werden [4]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{n_{\text{det}}}{n_{\text{emit}}} A_{\text{emit}}. \quad (5.1)$$

Da $n_{\text{det}} = n_{\text{det}}(\vartheta, \varphi)$ abhängig vom Einfallswinkel der Photonen ist, gilt dies auch für $A_{\text{eff}} = A_{\text{eff}}(\vartheta, \varphi)$. Die über alle Winkel gemittelte effektive Fläche des mDOM kann durch Integration über den gesamten Raumwinkel erhalten werden:

$$\bar{A}_{\text{eff}} = \frac{1}{N} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi A_{\text{eff}}(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta \, d\vartheta \, d\varphi. \quad (5.2)$$

Dabei dient

$$N = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \vartheta \, d\vartheta \, d\varphi = 4\pi \quad (5.3)$$

der Normierung. Da $A_{\text{eff}}(\vartheta, \varphi)$ einer diskreten Verteilung entspricht, wird das Integral durch eine Summe ersetzt:

$$\bar{A}_{\text{eff}} = \frac{1}{N} \sum_{\varphi=0^\circ}^{360^\circ} \sum_{\vartheta=0^\circ}^{180^\circ} A_{\text{eff}}(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta \quad (5.4)$$

$$N = \sum_{\varphi=0^\circ}^{360^\circ} \sum_{\vartheta=0^\circ}^{180^\circ} \sin \vartheta. \quad (5.5)$$

Ein Maß für den Verlust an Photonen bzw. effektiver Fläche, wie er durch die Modulaufhängung zustande kommt, ist die Abschattung

$$S = \frac{A_{\text{eff,ref}} - A_{\text{eff}}}{A_{\text{eff,ref}}} = \frac{n_{\text{det,ref}} - n_{\text{det}}}{n_{\text{det,ref}}}. \quad (5.6)$$

Dabei sind $A_{\text{eff,ref}}$ und $n_{\text{det,ref}}$ die effektive Fläche bzw. die Anzahl der detektierten Photonen des Moduls ohne Modulaufhängung. Die Abschattung ist somit (anders als die effektive Fläche) eine Größe, die im Sinne einer hohen Photon-Sensitivität des Detektors klein gehalten werden sollte. Sie spiegelt den Anteil der durch die Aufhängung verlorenen Photonen wider. Negative Abschattung kann durch statistische Schwankungen der Simulationsdaten⁵ oder Reflexion an Teilen der Aufhängung entstehen.

Eine weitere wichtige Kenngröße zur Beschreibung der Akzeptanz des mDOM ist die Inhomogenität, die als

$$I = \frac{A_{\text{eff,max}} - A_{\text{eff,min}}}{A_{\text{eff,max}}} \quad (5.7)$$

definiert ist [4], wobei $A_{\text{eff,max}}$ und $A_{\text{eff,min}}$ das Maximum bzw. Minimum der über den gesamten Raumwinkel simulierten Verteilung der effektiven Fläche des Moduls sind [4]. Ein entscheidender Vorteil des mDOM gegenüber dem bislang in IceCube verwendeten DOM mit einem großen PMT ist seine homogen über den gesamten Raumwinkel verteilte Akzeptanz. Durch die Bestimmung der Inhomogenität der Winkelakzeptanz des Moduls kann der Einfluss der Aufhängung auf die Isotropie der Photon-Sensitivität des Moduls untersucht werden.

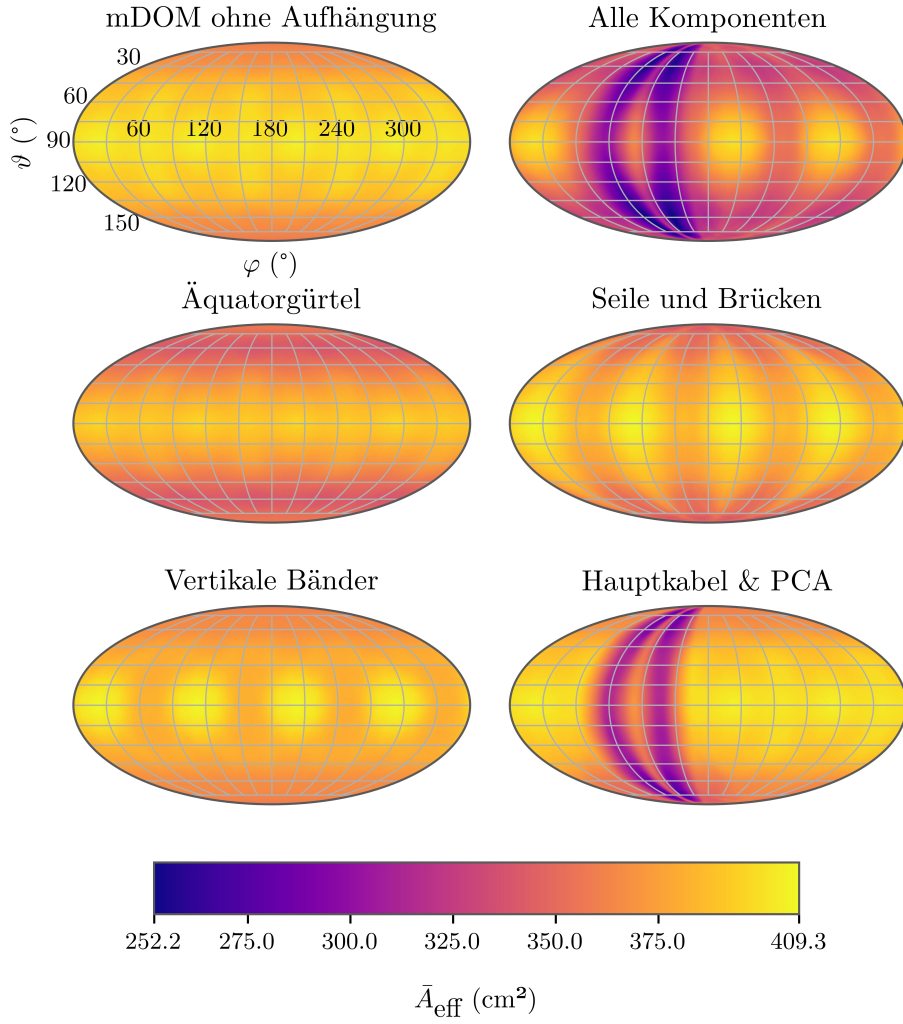


Abbildung 5.2: Verteilung der Akzeptanz des mDOM über den gesamten Raumwinkel für verschiedene Komponentengruppen der Aufhängung. Im Vergleich zur Winkelakzeptanz des Moduls ohne Aufhängung bilden sich in den anderen Verteilungen Strukturen aus, die auf den Einfluss der Komponenten zurückzuführen sind. Das Koordinatensystem wurde zur besseren Übersichtlichkeit nur in einer der Darstellungen hinzugefügt.

5.1 Überblick über die Simulationsergebnisse

In Abb. 5.2 ist die Winkelakzeptanz eines mDOM-Sensors bei verschiedenen Konfigurationen der Modulaufhängung dargestellt. Zum Vergleich ist auch die Simulation der Winkelakzeptanz ohne Aufhängung dargestellt, die als Referenzwert für die Quantifizierung der Abschattung dient. Die effektive Fläche des Moduls ist bei der Simulation des mDOM ohne Aufhängung relativ homogen über den gesamten Raumwinkel verteilt. Dies stellt einen der Vorteile des mDOM gegenüber dem bisher in IceCube verwendeten DOM dar (vgl. Abschnitt 3.3). Eine leicht verringerte Akzeptanz weist das Modul jedoch im Bereich der Pole auf. Dies ist auf die Verteilung der PMTs zurückzuführen.

Bei allen Simulationen, die Bauteile der Aufhängung enthalten, sind Strukturen in der Verteilung der Winkelakzeptanz zu erkennen. Komponenten vertikaler Ausdehnung wie das Hauptdatenkabel, die Seile oder die Stahlbänder, werfen vertikale Schatten. Bei horizontalen Strukturen der Aufhängung, wie dem Äquatorgürtel, weist die Winkelakzeptanz des Moduls

⁵Die statistische Unsicherheit einer Monte-Carlo-Simulation bei N detektierten Teilchen beträgt \sqrt{N} .

dementsprechend horizontal verlaufende Minima auf. Die Positionen, an denen diese Minima auftreten, entsprechen jedoch nicht zwangsläufig den Positionen der Bauteile. Komponenten, die zwischen zwei Reihen bzw. Spalten von PMTs verlaufen, werfen zwei symmetrisch versetzte Schatten, wobei die Symmetrieachse an der Position des Bauteils liegt. Dies ist dadurch zu erklären, dass die meisten Elemente der Aufhängung aufgrund ihrer Positionierung bei frontal einfallenden Photonen wenig oder keine photosensitive Fläche abdecken. Unter einem gewissen Neigungswinkel können diese Komponenten aber einzelne PMTs (teilweise) verdecken, was die effektive Fläche verringert. Dieses Verhalten wird in den folgenden Abschnitten näher untersucht.

Tabelle 5.1: Über den gesamten Raumwinkel gemittelte Werte der effektiven Fläche \bar{A}_{eff} , der Abschattung S und der Inhomogenität der Akzeptanz I für verschiedene Komponentengruppen der Aufhängung. Die aus der Simulation mit allen Komponenten erhaltenen Werte lassen sich nicht als Summe der Werte aus den Simulationen der einzelnen Bauteile auffassen.

Komponenten	\bar{A}_{eff} (cm ²)	S (%)	I (%)
mDOM ohne Aufhängung	$388,93 \pm 0,09$	–	$12,11 \pm 0,14$
Seile und Brücken	$380,20 \pm 0,09$	$2,24 \pm 0,04$	$17,24 \pm 0,14$
Äquatorgürtel	$368,54 \pm 0,09$	$5,24 \pm 0,04$	$14,63 \pm 0,14$
vertikale Stahlbänder	$381,90 \pm 0,09$	$1,81 \pm 0,04$	$12,69 \pm 0,14$
Hauptdatenkabel und PCA	$373,58 \pm 0,09$	$3,95 \pm 0,04$	$33,18 \pm 0,12$
Alle Komponenten	$341,03 \pm 0,09$	$12,32 \pm 0,04$	$37,21 \pm 0,11$

In Tabelle 5.1 sind die über den gesamten Raumwinkel gemittelten Werte der effektiven Fläche und der Abschattung sowie der Inhomogenität der Abb. 5.2 entsprechenden Verteilungen dargestellt. Darin zeichnet sich ab, wie viel die einzelnen Komponentengruppen zur gesamten Abschattung und zur Inhomogenität der Akzeptanz des Moduls beitragen. Der genaue Beitrag der einzelnen Komponenten ist daraus nicht zu entnehmen, da in der Aufhängung Überschneidungen verschiedener Bauteile auftreten. Würde also die Abschattung der einzelnen Bauteile addiert, ergäbe sich ein Wert, der die Abschattung, die von allen Teilen gleichzeitig produziert wird, übersteigt. Tabelle 5.1 bietet aber einen Anhaltspunkt, um die Bauteilgruppen hinsichtlich ihres Beitrags zur Abschattung zu ordnen. Demnach hat der Äquatorgürtel den größten Einfluss auf die Photon-Sensitivität des Moduls. Einen wesentlichen Anteil haben außerdem die Kabel. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die einzelnen Komponenten der Aufhängung genauer hinsichtlich ihrer Abschattung untersucht.

5.2 Seile und vertikale Bänder

In Abb. 5.3 ist die winkelabhängige Abschattung der Seile und Brücken sowie der vertikalen Stahlbänder dargestellt, die mit den in Abb. 4.4 (links bzw. Mitte rechts) abgebildeten Konfigurationen simuliert wurden. Sowohl die Bänder als auch die Seile sind vertikal verlaufende Komponenten und weisen daher zum Teil ähnliche Abschattungsmuster auf. Die horizontale Verteilung der effektiven Fläche für beide Konfigurationen ist in Abb. 5.4 jeweils für $\vartheta = 90^\circ$ (Moduläquator) und $\vartheta = 45^\circ$ (Region zwischen Äquator und Nordpol) dargestellt. Als Referenz ist jeweils auch die effektive Fläche des bloßen Moduls angegeben. Die Akzeptanz des mDOM ohne Aufhängung unterliegt relativ geringen Schwankungen, die allein auf die diskrete Anzahl an PMTs zurückzuführen sind. Sowohl bei $\vartheta = 0^\circ$ als auch bei $\vartheta = 45^\circ$ liegt eine vierfache Symmetrie in der Verteilung der effektiven Fläche vor. Die Zähligkeit dieser Symmetrie wird durch die Anzahl der gleichmäßig in einer Reihe verteilten PMTs bestimmt.

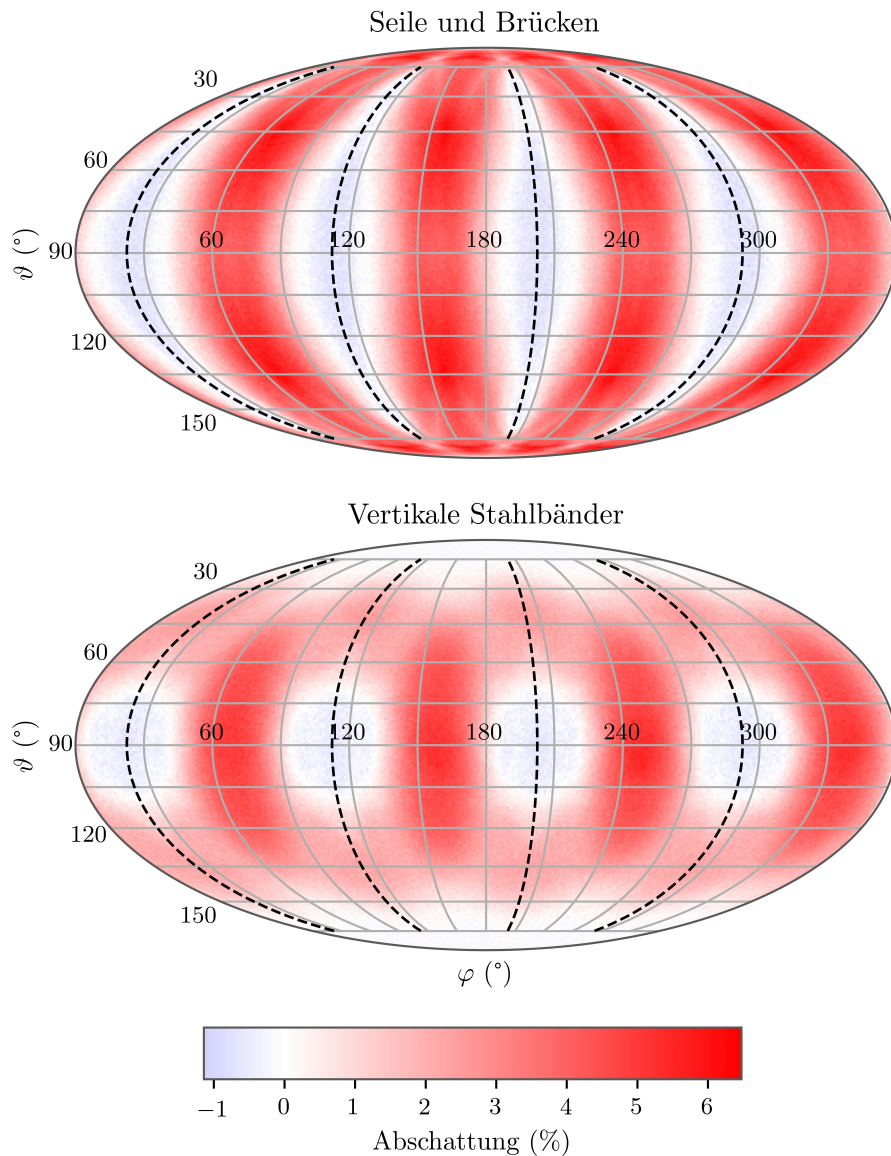


Abbildung 5.3: Verteilung der Abschattung über den gesamten Raumwinkel für die Simulation mit Seilen und Brücken (**oben**) und den Stahlbändern (**unten**). Die gestrichelten Linien markieren den Verlauf der Seile und der Stahlbänder. Negative Werte der Abschattung entsprechen einer erhöhten Akzeptanz gegenüber dem Modul ohne Aufhängung und sind durch Reflexion an den Bauteilen zu erklären.

Um beide Pole des Moduls ist eine Reihe mit 4 PMTs angeordnet. Daraus entsteht die vierfache diskrete Symmetrie der horizontalen Winkelakzeptanz.

Die Abweichung der effektiven Fläche unter Einbezug der Komponenten von der Referenzkurve in Abb. 5.4 entspricht der in Abb. 5.3 dargestellten Abschattung dieser Bauteile. Für $\vartheta = 90^{\circ}$ bilden sowohl die Seile und Brücken als auch die Bänder Minima in der Winkelakzeptanz des Moduls. Beide Verteilungen sind näherungsweise vierfach symmetrisch. Bei den Bändern sind die Minima der Verteilung jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Dies wird durch die Befestigungsschellen hervorgerufen, die jeweils einmal an beiden Bändern

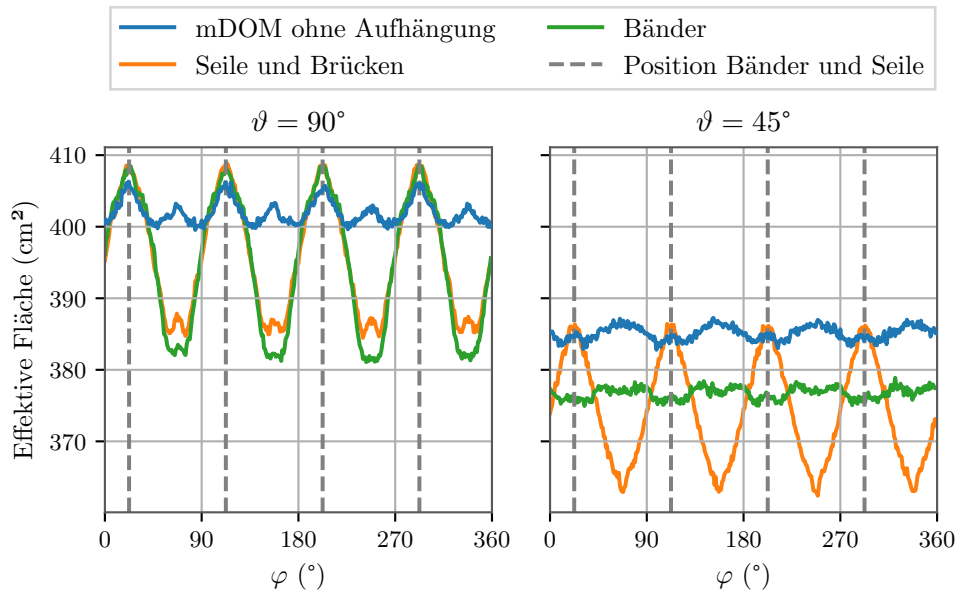


Abbildung 5.4: Akzeptanzverlauf entlang des Azimutalwinkels φ auf Höhe des Moduläquators (**links**) und zwischen Äquator und Nordpol (**rechts**). Dargestellt ist jeweils die Akzeptanz des Moduls mit Seilen und Brücken, vertikalen Stahlbändern und dem Modul ohne Aufhängung (als Referenzwert). Die Erhöhung der effektiven Fläche des Moduls durch Einbezug der Komponenten, wie um die Positionen der Komponenten (gestrichelte Linien), sind auf Reflexion an den Bauteilen zurückzuführen.

auf der südlichen Hemisphäre des Moduls angebracht sind. Die Winkel, bei denen die Seile und Bänder am meisten abschatten, liegen jeweils zwischen den Winkeln, an denen die Komponenten positioniert sind. Dies kann dadurch erklärt werden, dass bei frontal einfallenden Photonen durch Seile und Bänder keine photosensitive Fläche⁶ verdeckt wird. Dieses Verhalten ist in Abb. 5.5 (links) illustriert. Photonen, die aus diesem Winkel auf das Modul treffen, werden durch die Bauteile nicht abgeschirmt. Tatsächlich liegt die effektive Fläche unter diesen Einfallswinkeln sogar über der des bloßen Moduls, da Komponenten einige der Photonen auf das Modul reflektieren. Dieser Effekt kann auch unter anderen Einfallswinkeln auftreten. In diesen Bereichen dominiert jedoch die abschirmende Wirkung der Bauteile. Die Reflexion von Photonen tritt vermehrt an Seilen auf. Im Vergleich zu den Bändern bieten diese mehr Querschnittsfläche, an der Reflexion stattfinden kann. Die Bänder sind zwar in der Lage, Photonen vom Modul hinweg zu reflektieren, bieten aber aufgrund ihrer geringen Dicke weniger Querschnittsfläche, um Photonen durch Reflexion auf das Modul zu lenken. Die intrinsische Richtungssensitivität des mDOM kann durch Reflexion von Photonen an Komponenten der Aufhängung beeinflusst werden, da einige Photonen das Modul “von der falschen Seite” treffen. Somit geht die Richtungsinformation über reflektierte Photonen verloren. Die in Abb. 5.3, 5.4 und 5.6 erkennbare Erhöhung der Akzeptanz des Moduls unter bestimmten Einfallswinkeln durch Reflexion an Komponenten der Aufhängung muss daher auch unter diesem Gesichtspunkt bewertet werden. Um diesen Effekt einzudämmen, könnten einige Komponenten möglichst absorbierend (durch eine schwarze Oberfläche) gestaltet werden.

⁶hierzu kann im Rahmen dieser Arbeit im weiteren Sinn auch der Reflektor um ein PMT gezählt werden, da dieser die Winkelakzeptanz des PMT modelliert

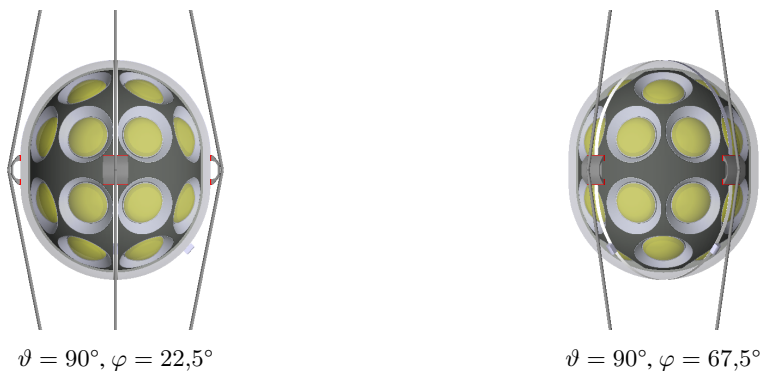


Abbildung 5.5: mDOM mit Seilen, Brücken und Bändern aus zwei verschiedenen Blickwinkeln. **Links:** Frontalansicht eines der Seile und Bänder. Da diese Komponenten zwischen zwei PMT-Reihen verlaufen, wird wenig photosensitive Fläche verdeckt. **Rechts:** Aus diesem Winkel wird mehr photosensitive Fläche verdeckt. Dies entspricht einem Minimum in der Akzeptanzverteilung des Moduls.

Abb. 5.5 (rechts) stellt den Azimutalwinkel dar, unter dem die Bänder bei $\vartheta = 90^\circ$ ein Maximum an photosensitiver Fläche verdecken. Dies entspricht den Winkeln mit minimaler Akzeptanz in Abb. 5.4. Hinsichtlich der Seile und Brücken hat die Verteilung an dieser Position ein lokales Maximum, was auf die Positionierung der PMTs und nicht auf den Einfluss des Bauteils selbst zurückzuführen ist. Während beide Bauteilgruppen im Bereich des Äquators des Moduls einen ähnlichen Einfluss auf die Photon-Sensitivität des mDOM haben, gilt dies nicht für $\vartheta = 45^\circ$. Während die Minima der Winkelakzeptanz unter Einbezug des Seile und Brücken ähnlich ausgeprägt sind wie in der Äquatorialebene, sind Schwankungen der effektiven Fläche, die von den Bändern hervorgerufen werden, über den gesamten Azimutalwinkel weniger stark ausgeprägt (\bar{A}_{eff} zwischen 374 und 379 cm^2). Unter jedem Einfallswinkel φ werden Teile photosensitiver Fläche verdeckt, daher variiert die Abschattung über alle φ nur geringfügig.

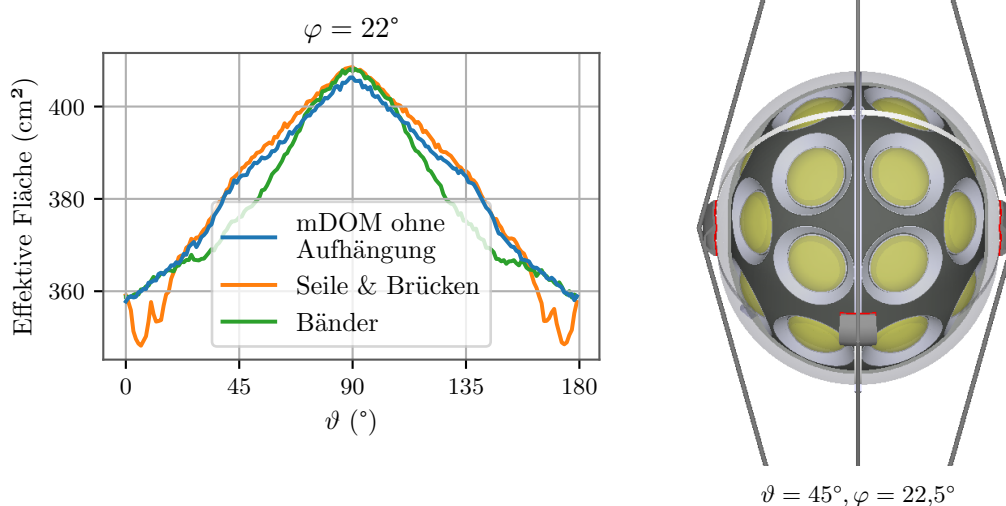


Abbildung 5.6: **Links:** Akzeptanzverlauf entlang des Polarwinkels ϑ bei $\varphi = 22^\circ$ (Position eines der Seile und Bänder). Dargestellt ist die Akzeptanz des Moduls mit Seilen und Brücken, vertikalen Stahlbändern und dem Modul ohne Aufhängung (als Referenzwert). **Rechts:** Blickwinkel, unter welchem am meisten Abschattung durch die Stahlbänder hervorgerufen wird.

In Abb. 5.6 (links) ist die vertikale Verteilung der effektiven Fläche des Moduls bei $\varphi = 22^\circ$ für die drei zuvor diskutierten Konfigurationen dargestellt. Die effektive Fläche ist für alle drei Konfigurationen maximal im Bereich des Moduläquators und nimmt in Richtung der

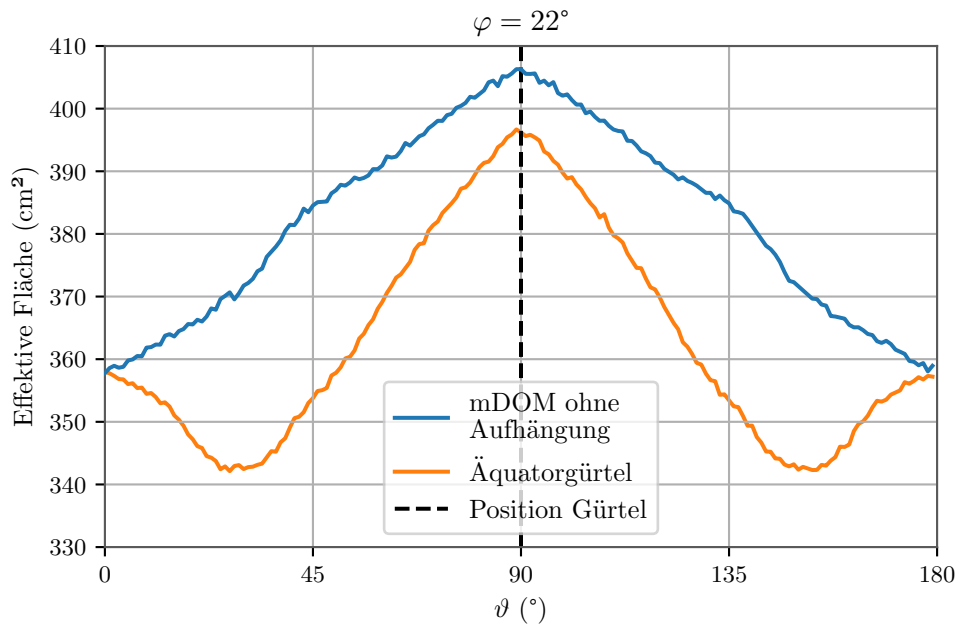


Abbildung 5.7: Akzeptanz des mDOM in Abhängigkeit vom Polarwinkel ϑ bei $\varphi = 22^\circ$. Dargestellt ist die effektive Fläche des Moduls mit Äquatorgürtel und ohne jegliche Komponenten der Aufhängung. Bei $\vartheta = 37^\circ$ ist die Abschattung durch den Äquatorgürtel maximal.

Pole ab. Allgemein ist von vertikal verlaufenden Strukturen eine sich nicht in ϑ verändernde Abschattung zu erwarten. Für die Seile und Brücken trifft dies nur in einem gewissen Bereich des Polarwinkels zu. Zum einen tritt die bereits in Abb. 5.4 zu sehende Reflexion am Seil auf, die zu einer Erhöhung der effektiven Fläche gegenüber dem Referenzwert in der Äquatorregion des Moduls führt. Außerdem verdecken die Seile aufgrund ihres Neigungswinkels aus steilem Winkel einfallende Photonen photosensitive Fläche.

Bei den Bändern liegt Abschattung in einem Bereich zwischen der Äquatorregion und den Polen des Moduls vor, die durch das orthogonal zum Einfallswinkel verlaufende Band entsteht. Für Einfallswinkel aus der Horizontalregion des Moduls, wie in Abb. 5.5 (links) zu sehen, bedeckt dieses Band keinen der Photomultiplier, aber bei aus steilerem Winkel einfallenden Photonen schirmt es Teile von PMTs ab. Dies ist in Abb. 5.6 (rechts) illustriert. Das dort dargestellte Verhalten lässt sich auf die Seile übertragen, nur dass die Abschirmung von photosensitiver Fläche bei noch steileren Einfallswinkeln erfolgt.

Wie sich ein Aufbau mit drei anstelle von vier Seilen, was der Aufhängung in der ersten IceCube-Generation entspricht, auf die Akzeptanz auswirkt, ist in Anhang A.2 dargestellt.

5.3 Äquatorgürtel

Der Äquatorgürtel des mDOM besteht aus zwei um das Modul laufenden Bändern – dem Scotch Tape und einem darüber verlaufenden, schmaleren Metallband. Hinsichtlich des Einflusses auf die Photon-Sensitivität des Moduls ist ausschließlich das Scotch-Tape von Bedeutung, da es breiter ist und direkt am Modul anliegt und das Metallband im Modell lediglich 1 mm dick ist. Reflexion von Photonen am Metallband kann daher ausschließlich vom Modul hinweg erfolgen. Da der Gürtel bezüglich Rotation um die z -Achse des Moduls symmetrisch ist, variiert die durch ihn produzierte Abschattung nicht in φ . In diesem Abschnitt wird daher nur die vertikale Komponente der Winkelakzeptanz untersucht. Diese ist in Abb. 5.7 für die Konfiguration nur mit Äquatorgürtel (vgl. Abb. 5.8 links und mittig) dargestellt. Für frontal

auf den Äquatorgürtel einfallende Photonen liegt die Abschattung knapp über 2 %. Nur der Rand der an den Gürtel angrenzenden Reflektoren wird vom Scotch Tape überdeckt.

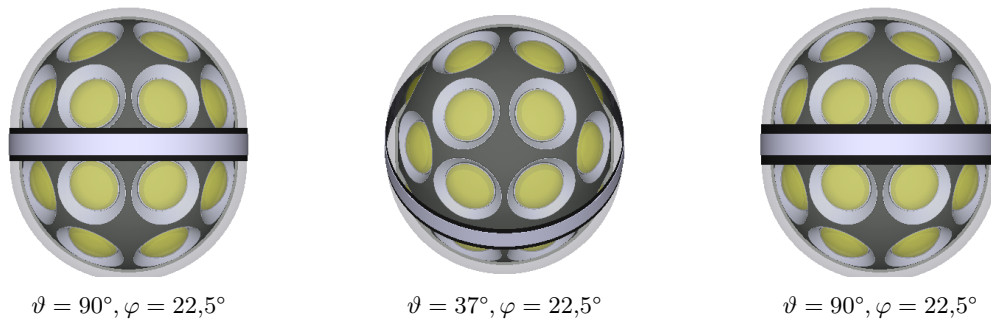


Abbildung 5.8: **Links:** Frontale Ansicht des Äquatorgürtels. Lediglich Teile der Reflektoren der umliegenden PMTs werden verdeckt. Die Abschattung ist hier relativ gering. **Mitte:** Blickwinkel, der dem Winkel maximaler Abschattung durch den Gürtel entspricht. **Rechts:** Verbreitertes Scotch-Tape (60 mm).

Bei steileren Einfallswinkeln verdeckt das Scotch Tape mehr photosensitive Fläche, wie in Abb. 5.8 (Mitte) dargestellt. Um $\vartheta = 37^\circ$ ist der Einfluss des Äquatorgürtels maximal mit Abschattungswerten $> 8\%$. Bei Photonen, die aus den Polarregionen auf das Modul einfallen, nimmt die Abschattung des Gürtels zum Pol hin ab. Das Scotch Tape verdeckt in diesem Fall kaum oder keine sensitive Fläche. Dazu tragen auch die Gelschicht und das Glas des Druckbehälters bei, die das Tape räumlich von den PMTs trennen. Somit können Photonen PMTs auf der vom Einfallswinkel abgewandten Hemisphäre des Moduls erreichen; ihre Laufbahn führt dann unter dem Gürtel hindurch.

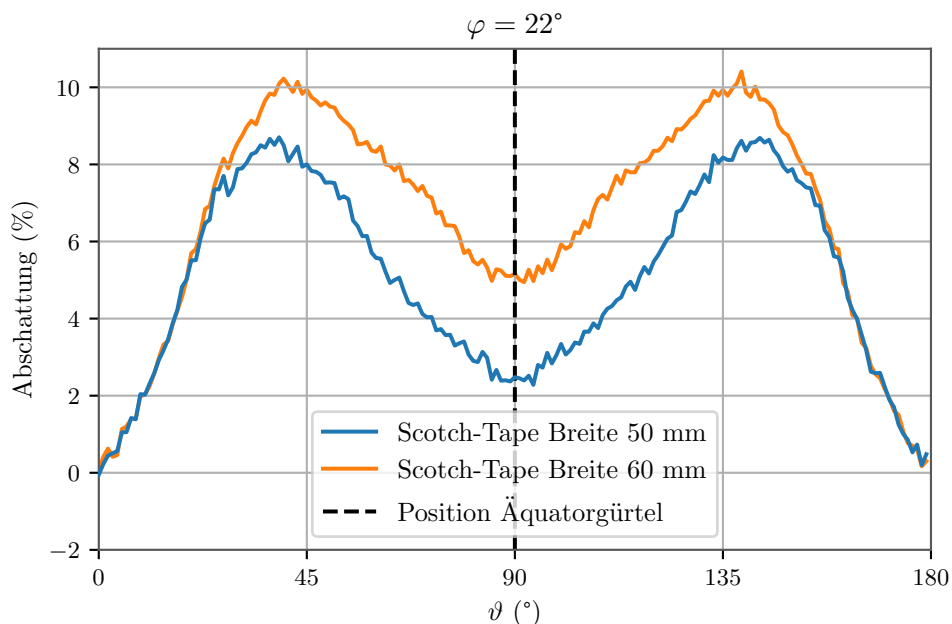


Abbildung 5.9: Vergleich der Abschattung durch Scotch-Tapes verschiedener Breite. Dargestellt ist der Abschattungsverlauf in ϑ für $\varphi = 22^\circ$. Besonders im Äquatorbereich des Moduls sorgt eine Verbreiterung für zusätzlichen Akzeptanzverlust. Dieser Effekt nimmt in Richtung der Polregionen ab.

Über den gesamten Raumwinkel gemittelt trägt der Äquatorgürtel von allen in dieser Arbeit

untersuchten Komponentengruppen am meisten zum Verlust an Photonen durch die Aufhängung bei. Er dient dem Schutz des Tera Tape, das den Übergang zwischen beiden Modulhälften abdichtet. Ein verbreitertes Scotch-Tape bietet zusätzlichen Schutz der Schnittstelle. Im Folgenden wird untersucht, wie sich eine Verbreiterung des Scotch Tape von 50 mm auf 60 mm auf das Abschattungsverhalten des Gürtels bzw. der gesamten Aufhängung auswirken würde. Die Abschattung des verbreiterten Bandes ist zusammen mit der der aktuell bevorzugten Variante in Abb. 5.9 dargestellt. Bis auf einen Bereich um die Polregionen des Moduls sorgt die verbreiterte Variante des Scotch Tape für zusätzliche Abschattung. Dieser Effekt tritt verstärkt im Bereich zwischen Äquator- und Polarregion des mDOM auf, bei $\vartheta = 108^\circ$ steigt die Abschattung durch die Verbreiterung von $(3,75 \pm 0,15) \%$ auf $(7,11 \pm 0,15) \%$. Bei Frontalansicht des Gürtels (vgl. Abb. 5.8 links und rechts) ist die Querschnittsfläche des Scotch-Tape am größten. Unter steileren Einfallswinkeln verkleinert sich diese. Je breiter das Scotch-Tape, desto schneller erfolgt diese Verkleinerung mit steiler werdenden Einfallswinkeln. Daher nimmt die zusätzlich durch die verbreiterte Variante verursachte Abschattung vom Äquator zu den Polen hin ab.

Tabelle 5.2: Mittlere effektive Fläche \bar{A}_{eff} und Abschattung S sowie die Inhomogenität der Akzeptanz des Moduls I für beide Varianten des Scotch-Tape. Die Verbreiterung des Tape sorgt für eine verringerte Akzeptanz des Moduls, die Inhomogenität der Akzeptanz steigt jedoch nicht an.

Konfiguration	Tape-Breite (mm)	\bar{A}_{eff} (cm ²)	S (%)	I (%)
Äquatorgürtel	50	$368,54 \pm 0,09$	$5,24 \pm 0,04$	$14,63 \pm 0,14$
	60	$360,52 \pm 0,09$	$7,30 \pm 0,04$	$12,94 \pm 0,15$
Komplettes Modell	50	$341,03 \pm 0,09$	$12,32 \pm 0,04$	$37,21 \pm 0,11$
	60	$333,68 \pm 0,09$	$14,21 \pm 0,04$	$35,86 \pm 0,12$

Die über das gesamte Modul gemittelten Auswirkungen eines verbreiterten Bandes sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Neben der effektiven Fläche und der Abschattung ist auch die Inhomogenität des Moduls angegeben. Tabelle 5.2 zeigt, dass eine Verbreiterung des Scotch Tape zwar mit einem Verlust an effektiver Fläche einhergeht, die Inhomogenität des Moduls jedoch nicht vergrößert. Dies ist darin begründet, dass Photonen, die das Modul von oben bzw. unten treffen, nicht durch das Scotch Tape abgeschirmt werden. Der Verlust an Photonen beschränkt sich demnach auf den Bereich des Raumwinkels, in dem die effektive Fläche des Moduls, wie in Abschnitt 5.1 diskutiert, maximal ist.

5.4 Kabelaufbau

Das neben dem Modulstrang verlaufende Hauptdatenkabel beeinflusst die Akzeptanz des gesamten mDOM wesentlich. Die Komponentengruppe aus Hauptdatenkabel und PCA hat nach dem bereits diskutierten Äquatorgürtel den nächstgrößten Anteil aller simulierten Konfigurationen am Verlust von Photonen durch die Aufhängung. Im Folgenden wird die horizontale Verteilung der effektiven Fläche für die Simulation dieser Komponentengruppe untersucht, die in Abb. 5.10 dargestellt ist. Der Teil des Raumwinkels, in dem durch die Komponenten mehr als 1 % Abschattung auftritt, erstreckt sich von $\varphi = -117^\circ$ bis $\varphi = -17^\circ$. Das Hauptdatenkabel verursacht, ähnlich wie die Bänder und Seile, zwei symmetrisch versetzte Schatten. Die entsprechenden Minima in der Verteilung der effektiven Fläche liegen jeweils um 24° in φ versetzt zur Position des Kabels. An diesen Stellen beträgt die effektive Fläche knapp über 314 cm^2 , was einer Abschattung von mehr als 21,5 % entspricht (aufgrund statistischer Schwankungen weichen die Werte beider Minima leicht voneinander ab). Für Photonen, die an der Stelle des Kabels frontal auf das Modul einfallen, beträgt die effektive

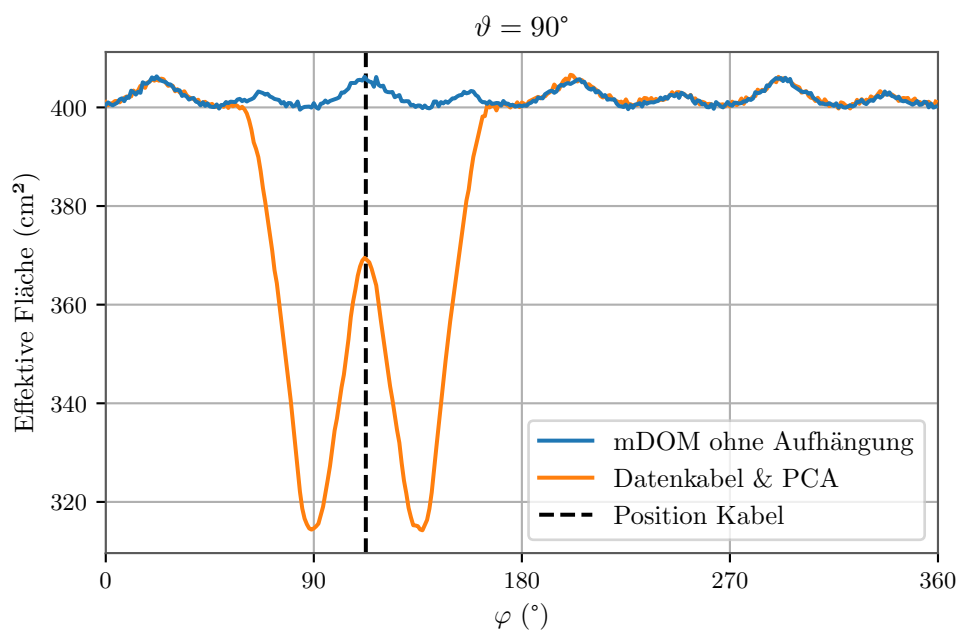


Abbildung 5.10: Akzeptanzverlauf des Moduls mit Kabeln und ohne Aufhängung auf Höhe des Äquators. Die beiden Minima effektiver Fläche um die Kabelposition in der Verteilung mit Kabeln sind charakteristisch für den Einfluss des Hauptdatenkabels, sofern dieses zwischen zwei PMT-Reihen platziert ist.

Fläche $\bar{A}_{\text{eff}} = (369,15 \pm 0,42) \text{ cm}^2$. Zur Veranschaulichung der Überschneidung der Kabel mit photosensitiver Fläche bei den markanten Einfallswinkeln dient Abb. 5.11.



Abbildung 5.11: Links: Frontalansicht des Hauptdatenkabels. Die Abdeckung photosensitiver Fläche durch das Kabel beschränkt sich auf Teile der Reflektoren und der Photokathode der PMTs in der Umgebung. **Rechts:** Blickwinkel, der dem Winkel maximaler Abschattung durch die Kabel entspricht. Vier PMTs werden zu großen Teilen von den Kabeln verdeckt.

Nach aktuellem Stand der Planungen der Modulaufhängung wird das Hauptdatenkabel, wie oben diskutiert, an einer der Brücken befestigt. Der Verlust der Akzeptanz des Moduls soll so minimiert werden, da das Kabel über eines der Seile und eines der Bänder und dadurch zwischen zwei PMT-Reihen verläuft. Eine Variante, bei der das Kabel an einer anderen Stelle befestigt wird, sodass es direkt am Glas anliegt, würde den Durchmesser des Gesamtaufbaus verkleinern, was wegen des begrenzten Radius des Bohrlochs von Vorteil wäre. Im Folgenden wird diese Lösung hinsichtlich ihres Einflusses auf die Akzeptanz des mDOM untersucht. Dabei wird eine in Bezug auf die Abschattung besonders ungünstige Position des Kabels gewählt, bei der es genau über zwei an den Moduläquator angrenzenden PMTs verläuft.

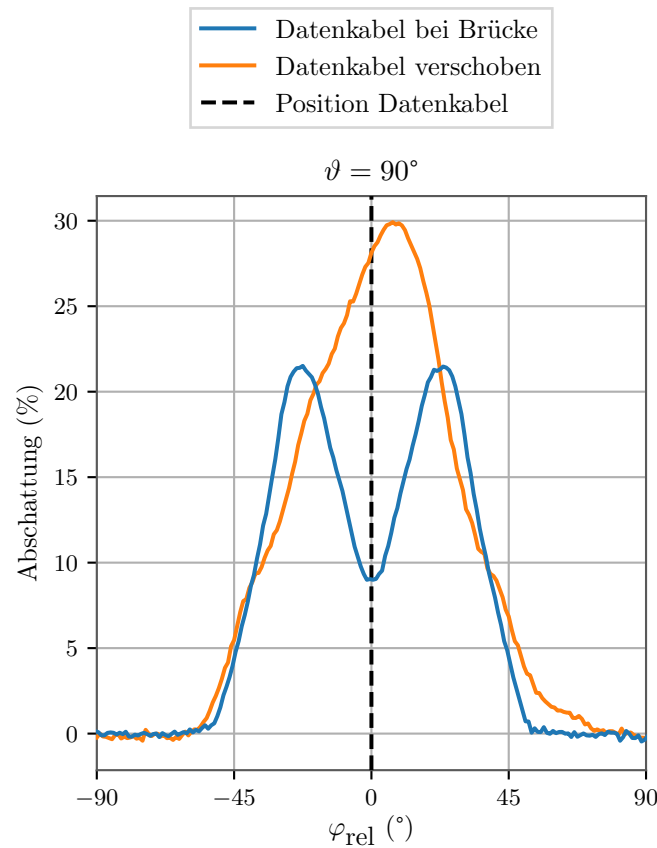


Abbildung 5.12: Verteilung der Abschattung der Kabel in φ_{rel} auf Höhe des Moduläquators für verschieden positionierte Hauptdatenkabel. φ_{rel} entspricht dem Einfallswinkel des Photonenstrahls relativ zur jeweiligen Position des Hauptdatenkabels.

In Abb. 5.12 ist die Abschattung des Kabelaufbaus (Hauptdatenkabel und PCA) im Bereich um das Kabel für beide Kabelpositionen dargestellt. Dabei ist das Koordinatensystem jeweils so gewählt, dass die Kabelposition bei $\varphi_{\text{rel}} = 0^\circ$ liegt. Die beiden an der Position des Kabels gespiegelten Maxima bei der Abschattung, die die ursprüngliche Konfiguration erzeugt, sind den Minima der Verteilung in Abb. 5.10 zuzuordnen. Die Verteilung der Abschattung bei verschobenem Datenkabel weist eine abweichende Charakteristik auf. Anstelle zweier symmetrischer Maxima, die um einen gewissen Einfallswinkel φ gegenüber der Position des Kabels verschoben sind, tritt in diesem Fall der größte Verlust an effektiver Fläche unter fast frontalem Einfallswinkel der Photonen auf das Kabel auf. Dieser Effekt wird durch die Überlappung mit den beiden PMTs an der Position des Kabels hervorgerufen. Diese ist maximal bei frontal auf das Kabel einfallenden Photonen, aber von den PMTs der darüber- bzw. darunterliegenden Reihe sind noch Teile unbedeckt. Die insgesamt am meisten photosensitive Fläche umfassende Abdeckung von PMTs, also die Stelle der maximalen Abschattung, ist daher um 8° gegenüber der Kabelposition versetzt. An dieser Stelle beträgt die Abschattung $S = (30,10 \pm 0,12) \%$. Die Überlappung mit photosensitiver Fläche bei $\varphi = 0^\circ$ und $\varphi = 8^\circ$ sind in Abb. 5.13 illustriert.

Auch der für die ursprüngliche Position des Kabels diskutierte Einflussbereich des Kabelensembles, der mit Datenkabel an der Brücke bei $\vartheta = 90^\circ$ einen Bereich von 100° des Azimutwinkels abdeckt, verändert sich durch Verschiebung des Datenkabels. Er umfasst mit der alternativen Positionierung 119° . Dies kann mehrere Ursachen haben. Zum einen kann durch



Abbildung 5.13: Darstellungen der Verschiebung des Hauptdatenkabels, wie sie in dieser Arbeit realisiert wurden. **Links:** Frontalansicht des verschobenen Hauptdatenkabels. **Rechts:** Der Einfallswinkel, unter welchem die Kabel am meisten abschatten, unterscheidet sich vom frontalen Einfallswinkel.

die Modulgeometrie ein breiterer Bereich durch die Verschiebung des Kabels abgedeckt werden. Dies ist jedoch vermutlich nicht der (alleinige) Grund für die Vergrößerung des Einflussbereichs. Außerdem käme das PCA infrage, welches nicht mit dem Datenkabel verschoben wird. In der Variante ohne Verschiebung des Datenkabels befinden sich beide Komponenten an der gleichen Stelle in φ . Durch die Verschiebung würde sich somit der Einflussbereich vergrößern. Darüber hinaus könnte auch die Änderung des Abstands vom Datenkabel zum Modul zu einer Änderung des Einflussbereichs der Komponente führen. Objekte, die weiter vom Modul entfernt sind, decken allgemein einen kleineren Bereich des Raumwinkels ab. Auch diese Überlegung würde jedoch vermutlich keine Verbreiterung um 19° nach sich ziehen, beläuft sich die Änderung der Distanz zum Modul doch auf wenige Zentimeter.

Tabelle 5.3: Mittlere effektive Fläche \bar{A}_{eff} und Abschattung S sowie die Inhomogenität der Akzeptanz des Moduls I für verschieden positionierte Hauptdatenkabel. Die Verschiebung des Kabels führt sowohl zu einer Erhöhung der Abschattung als auch der Inhomogenität. Hierbei ist zu beachten, dass eine Verschiebung mitten über eine PMT-Reihe hinsichtlich Akzeptanz und Homogenität wohl den ungünstigsten Fall darstellt.

Konfiguration	Position Datenkabel	\bar{A}_{eff} (cm ²)	S (%)	I (%)
Kabelensemble	ursprünglich	$373,58 \pm 0,09$	$3,95 \pm 0,04$	$33,18 \pm 0,12$
	verschoben	$369,50 \pm 0,09$	$5,00 \pm 0,04$	$36,04 \pm 0,11$
Komplettes Modell	ursprünglich	$341,03 \pm 0,09$	$12,32 \pm 0,04$	$37,21 \pm 0,11$
	verschoben	$330,07 \pm 0,08$	$15,13 \pm 0,04$	$39,46 \pm 0,11$

Die über den gesamten Raumwinkel gemittelten Auswirkungen einer Verschiebung des Datenkabels auf die Akzeptanz des Moduls sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Der durch eine Verschiebung zusätzlich verursachte Verlust an Photonen kann als oberer Grenzwert betrachtet werden, da die gewählte Position des Kabels vermutlich am ungünstigsten wäre. Eine Verschiebung, bei der keiner der PMTs frontal verdeckt wird, wäre hinsichtlich der Abschattung wohl von Vorteil. Mit einem Verlust an Akzeptanz und Homogenität der Akzeptanz ist aber auch bei kleineren Verschiebungen zu rechnen. Die ursprüngliche Positionierung des Kabels ist in diesem Zusammenhang also sinnvoll. Welche Variante bevorzugt wird, hängt aber auch von den entstehenden Kosten durch die Größe des Bohrlochs ab.

Die Homogenität der Akzeptanz des Moduls über den Raumwinkel wird durch äußere Komponenten des Detektoraufbaus, wie das Datenkabel, beeinträchtigt. „Blinde Flecken“, wie durch das Datenkabel verursacht, sind unvermeidbar. Um dennoch eine möglichst isotrope

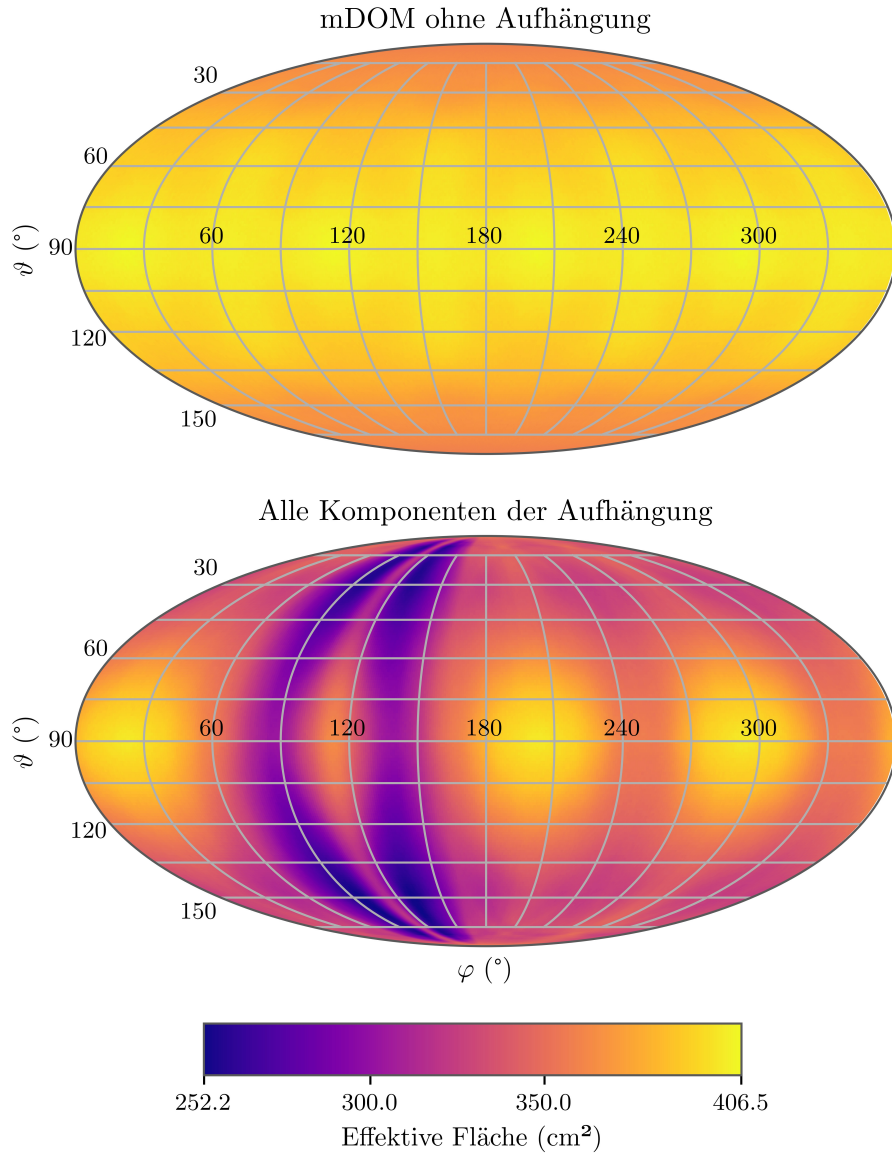


Abbildung 5.14: Verteilung der Winkelakzeptanz des mDOM über den gesamten Raumwinkel für das Modul ohne Aufhängung (**oben**) und mit vollständiger Aufhängung (**unten**).

Winkelakzeptanz des Gesamtaufbaus von IceCube Upgrade beizubehalten, könnten die Kabel jeden Stranges zu unterschiedlichen Seiten ausgerichtet werden.

5.5 Gesamte Modulaufhängung

Durch die vorangehenden Untersuchungen der einzelnen Komponentengruppen ist es möglich, die Auswirkungen des Gesamtmodells auf die Winkelakzeptanz des Moduls zu charakterisieren. Die Winkelakzeptanz des Moduls über den ganzen Raumwinkel ist in Abb. 5.14 dargestellt. Diese spiegelt den Verlust an Photonen durch die Aufhängung wider, der nach den Annahmen des Modells bei Messungen des mDOM auftritt. Die in Abb. 5.14 erkennbaren Strukturen werden im Folgenden für ϑ und φ einzeln betrachtet.

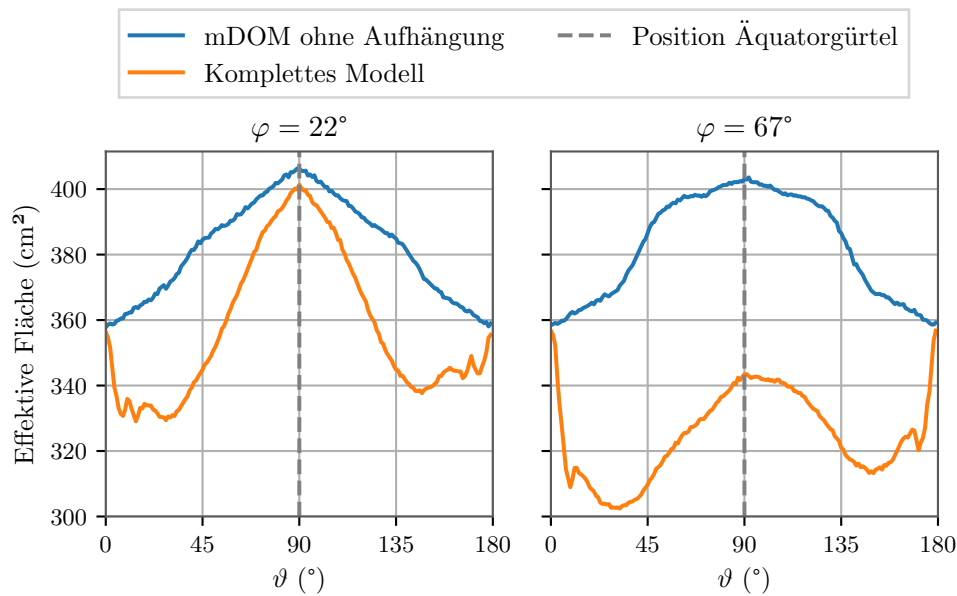


Abbildung 5.15: Akzeptanzverlauf des mDOM mit allen Komponenten der Aufhängung und ohne Aufhängung in Abhängigkeit vom Polarwinkel ϑ für zwei feste Azimutalwinkel. In dieser Verteilung ist der Einfluss des Äquatorgürtels und der Stahlbänder erkennbar. Die Asymmetrie der Verteilung ist auf den Einfluss des PCA zurückzuführen. Die insgesamt geringere Akzeptanz bei $\varphi = 67^\circ$ (rechts, zwischen zwei Seilen und Bändern) kann durch den Einfluss der vertikal verlaufenden Komponenten erklärt werden.

Zunächst wird der Akzeptanzverlauf entlang zweier fester Azimutalwinkel untersucht. Dieser ist in Abb. 5.15 dargestellt. Dominant ist der Einfluss des Äquatorgürtels, der in Abschnitt 5.3 diskutiert wurde. Hinzu kommt zusätzliche Abschattung im Bereich der nördlichen Hemisphäre des Moduls durch das PCA-Kabel. Im Bereich der Pole tragen außerdem die vertikalen Bänder und die Seile zum Verlust von Photonen bei. Der sprunghafte Anstieg der effektiven Fläche unmittelbar um die Pole kommt dadurch zustande, dass aus der “Vogelperspektive” alle Seile und Bänder sowie das PCA-Kabel, welches entlang eines der Seile verläuft, zwischen PMTs verlaufen. Qualitativ verhält sich die vertikale Winkelakzeptanz für $\varphi = 22^\circ$ (die Position eines der Seile und eines der Bänder) und $\varphi = 67^\circ$ (genau zwischen zwei Seilen und Bändern) gleich, die effektive Fläche ist bei letztgenanntem Winkel jedoch insgesamt deutlich geringer, was auf die horizontale Verteilung der Akzeptanz zurückzuführen ist. Bei $\varphi = 67^\circ$ erzeugen Seile und Bänder mehr Abschattung, außerdem übt das Hauptdatenkabel Einfluss auf die Akzeptanz aus.

In Abb. 5.16 ist die horizontale Verteilung der Akzeptanz des mDOM mit und ohne Aufhängung abgebildet. Die von den Seilen und Bändern produzierten lokalen Minima effektiver Fläche treten versetzt zu den Positionen der Komponenten auf (siehe Abschnitt 5.2). Bei Einfallswinkeln zwischen den Positionen zweier Seile und Bänder summiert sich die Abschattung der Komponenten auf, da aus dieser Perspektive keine Überschneidung der Bauteile auftritt. Unmittelbar um die Position des Datenkabels dominiert dessen Abschattungscharakteristik, die in Abschnitt 5.4 diskutiert wurde. Die an dieser Stelle verlaufenden Seile und Bänder werden vom Kabel verdeckt und tragen daher nicht weiter zur Abschattung bei. Der Einfluss des PCA-Kabels ist bei unter dem Winkel $\vartheta = 30^\circ$ einfallenden Photonen erkennbar. Dieses verursacht zusätzliche Abschattung auf der dem Datenkabel zugewandten Seite des Moduls. Dadurch sind die an den Stellen der Seile und Brücken auftretenden Maxima in der Verteilung der Akzeptanz weniger ausgeprägt und leicht von der Seilposition verschoben. Für

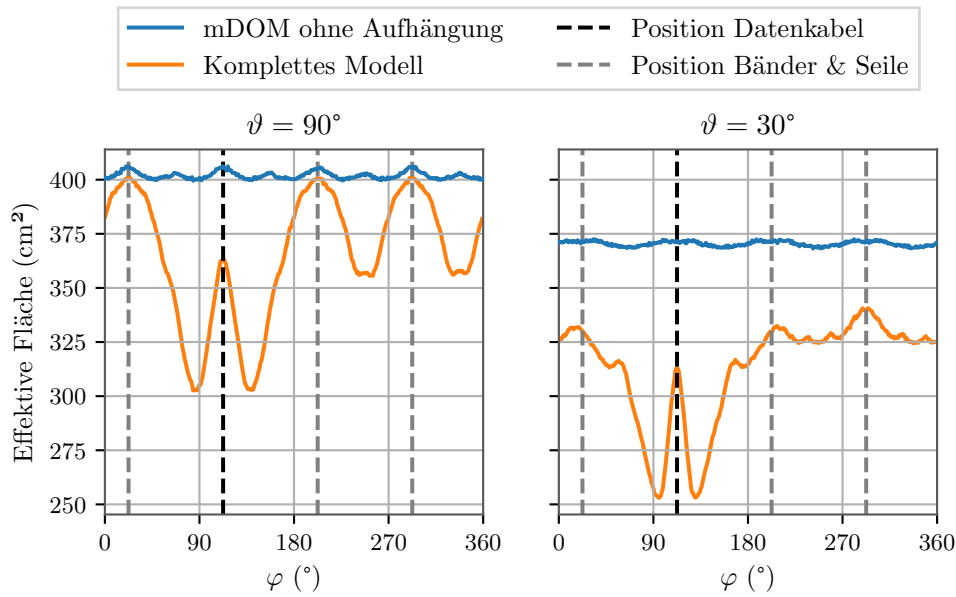


Abbildung 5.16: Effektive Fläche des mDOM mit kompletter Aufhängung und ohne Aufhängung als Funktion des Einfallswinkels φ in der Äquatorebene (**links**) und bei $\vartheta = 30^\circ$ (**rechts**). Zu erkennen sind die Einflüsse der vertikal verlaufenden Komponenten. Das Hauptdatenkabel verursacht jeweils zwei Akzeptanzminima um die Kabelposition, die weiteren lokalen Minima werden durch die Stahlbänder und Seile hervorgerufen.

zusätzliche Abschattung über den gesamten Azimutalwinkel sorgt der Äquatorgürtel. Wie in Abschnitt 5.3 gezeigt wurde, ist dieser Effekt außerhalb der Äquatorregion am stärksten. Da die Abschattung des Gürtels symmetrisch in φ ist, bilden sich durch ihn in den in Abb. 5.16 gezeigten Verteilungen keine weiteren Strukturen aus.

5.6 Wellenlängenabhängigkeit der Abschattung

In Abb. 5.17 ist die Wellenlängenabhängigkeit der mittleren Abschattung der gesamten Aufhängung dargestellt. Bei den dazu durchgeführten Simulationen wird mit $4 \cdot 10^4$ statt $3 \cdot 10^6$ Photonen simuliert und außerdem als Schrittweite in ϑ und φ jeweils 2° anstelle von 1° verwendet, um den hohen Rechenaufwand zu kompensieren, da für jede Wellenlänge ein kompletter Raumwinkelscan des Moduls durchgeführt wird. Die Wellenlänge wird mit einer Schrittweite von 1 nm im Bereich 300 nm - 400 nm und 5 nm außerhalb dieses Bereichs variiert.

Im Bereich 200 nm - 300 nm werden keine Photonen vom mDOM detektiert, da das Druckbehälterglas und das Gel in diesem Wellenlängenbereich nicht transparent sind [4]. Die Aufhängung sorgt also nicht für einen Verlust an detektierten Photonen. Die Abschattung ist maximal bei $\lambda = 334$ nm und liegt an dieser Stelle bei $(12,84 \pm 0,08) \%$. Für $\lambda > 353$ nm ändert sich die Abschattung nur geringfügig mit der Wellenlänge (Anstieg von $(12,32 \pm 0,07) \%$ bei $\lambda = 353$ nm auf $(12,48 \pm 0,07) \%$ bei $\lambda = 695$ nm).

Die in Abb. 4.5 dargestellte Wellenlängenabhängigkeit der für die Aufhängung verwendeten Reflexionskoeffizienten beeinflusst die Änderung der Abschattung mit der Wellenlänge. Zu erwarten ist ein Abfall der Abschattung mit steigenden Reflexionskoeffizienten der Bauteile,

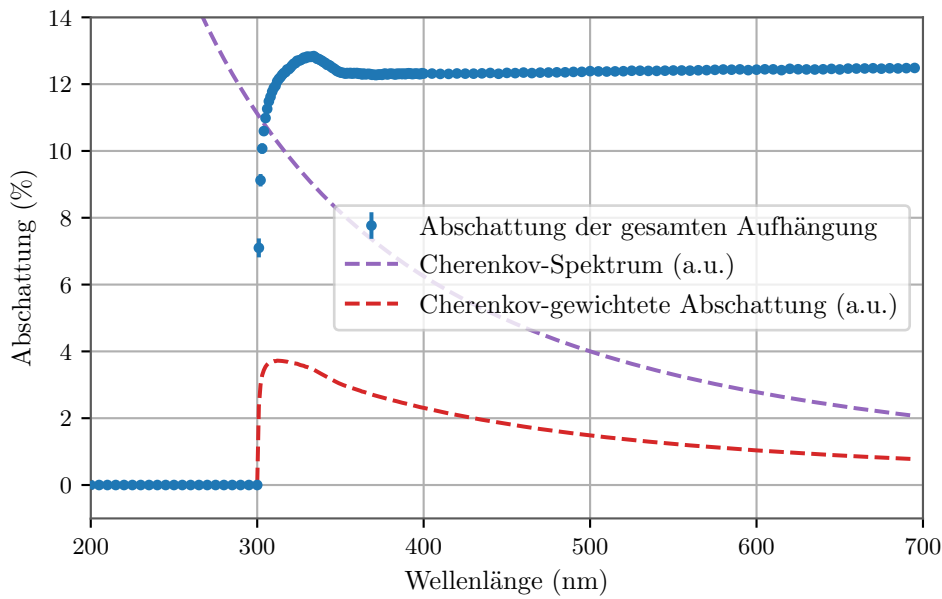


Abbildung 5.17: Über den Raumwinkel gemittelte Abschattung der gesamten Aufhängung als Funktion der Wellenlänge der emittierten Photonen. Dargestellt in willkürlichen Einheiten (a.u.) sind der Verlauf einer Cherenkov-Spektralverteilung und die Cherenkov-gewichtete Abschattung.

da bei einer höheren Reflektivität weniger Photonen absorbiert werden und somit mehr Photonen detektiert werden können. Eine wichtige Rolle spielt auch die Wellenlängenabhängigkeit der Brechungsindizes des Gels, des Behälterglases und des umliegenden Eises, da diese für den Brechungswinkel des Lichts an Übergängen zwischen zwei Medien entscheidend sind. Demnach können Photonen je nach Wellenlänge unter unterschiedlichen Einfallswinkeln an den PMTs eintreffen.

Tabelle 5.4: Über den gesamten Raumwinkel und alle Wellenlängen gemittelte effektive Fläche \bar{A}_{eff} und Abschattung S für das mDOM ohne Aufhängung bzw. mit kompletter Aufhängung. Im Falle des flachen Spektrums sind alle Wellenlängen gleich gewichtet, beim Cherenkov-Spektrum erfolgt die Gewichtung mit $1/\lambda^2$.

Gewichtung	Konfiguration	\bar{A}_{eff} (cm ²)	S (%)
flaches Spektrum	ohne Aufhängung	$373,80 \pm 0,02$	–
	mit Aufhängung	$327,48 \pm 0,02$	$12,39 \pm 0,01$
Cherenkov-Spektrum	ohne Aufhängung	$349,48 \pm 0,02$	–
	mit Aufhängung	$306,23 \pm 0,02$	$12,38 \pm 0,01$

Die Raumwinkel- und Wellenlängen⁷-gemittelte Akzeptanz des Moduls ist in Tabelle 5.4 dargestellt. Es wird zwischen der gleichen Gewichtung aller Wellenlängen der einfallenden Photonen und einer Gewichtung mit $1/\lambda^2$ unterschieden. Eine flache Spektralverteilung ist näherungsweise bei Cherenkov-Photonen vorzufinden, die nach ihrer Entstehung bereits eine gewisse Distanz im Detektor zurückgelegt haben. Photonen kürzerer Wellenlängen sind stärker von Streuung im Eis betroffen, daher flacht das Spektrum mit zunehmender zurückgelegter Wegstrecke ab [18]. Dieser Fall ist besonders bei der Detektion hochenergetischer Neutrinos von Interesse. Im Bereich niederenergetischer Neutrinos, der mit IceCube Upgrade untersucht wird, erfolgt die Detektion des Cherenkov-Lichts meist nah an der Entstehungsquelle

⁷Der Wellenlängenbereich 200 nm - 300 nm wird nicht berücksichtigt, da in diesem Bereich keine Photonen detektiert werden.

der Photonen. Die Spektralverteilung dieser Photonen entspricht somit einem Cherenkov-Spektrum, dargestellt in Abb. 5.17. Die der Frank-Tamm-Formel (vgl. Gleichung (2.4)) entsprechend mit $1/\lambda^2$ gewichtete Abschattung, ebenfalls in Abb. 5.17 dargestellt, wird durch die Gewichtung hin zu kürzeren Wellenlängen verschoben, die maximale Abschattung tritt bei $\lambda = 312 \text{ nm}$ auf. Die über den gesamten Wellenlängenbereich gemittelte Abschattung weicht für beide Gewichtungen nur geringfügig voneinander ab.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Modulaufhängung auf die Photonen-Akzeptanz des mDOM-Sensors untersucht. Dazu wurde der Einfall optischer Photonen auf ein Modell des Moduls und seiner Aufhängung simuliert.

Für mittlere Abschattung, die durch die Aufhängung hervorgerufen wird, ergibt sich der Wert $(12,32 \pm 0,04) \%$ bei einer Wellenlänge von 400 nm. Mögliche Abweichungen von der tatsächlich verursachten Abschattung könnten durch Abweichungen des verwendeten Modells von der tatsächlichen Aufhängung auftreten. Beispielsweise wurden die den Komponenten der Aufhängung zugewiesenen Reflexionskoeffizienten ihren jeweiligen Materialien entsprechend gewählt, da keine Messungen des Reflexionsverhaltens der Aufhängung vorliegen.

Die abschirmende Wirkung der Aufhängung ist über einen großen Bereich des Raumwinkels zwar gegenüber der reflektierenden Wirkung dominant, aber die Ablenkung von Photonen in Richtung des Moduls muss dennoch beachtet werden, da in einem solchen Fall eine verfälschte Richtungsinformation vom Modul gemessen werden kann. Um diesen Effekt zu verhindern, könnten die Bauteile der Aufhängung mit absorbierenden Oberflächen versehen werden.

Durch Simulation mit unterschiedlichen Komponentengruppen der Aufhängung konnte der Beitrag der einzelnen Komponenten zur Abschattung der gesamten Aufhängung eingeordnet werden. Über den gesamten Raumwinkel gemittelt hat demnach der Äquatorgürtel (im Wesentlichen das Scotch-Tape) den größten Anteil an der Abschattung durch die Aufhängung, da er über einen besonders großen Bereich des Raumwinkels photosensitive Fläche verdeckt. Die Simulation ausschließlich mit Äquatorgürtel ergab eine mittlere Abschattung von $(5,24 \pm 0,04) \%$. Gleichermaßen konnte der Einfluss einzelner Komponenten auf die Homogenität der Akzeptanz des Moduls ermittelt werden. Der Kabelaufbau und damit besonders das Hauptdatenkabel ruft verglichen mit den anderen Bauteilen eine stark ausgeprägte Inhomogenität der Winkelakzeptanz hervor, da es in einem gewissen Bereich besonders viel photosensitive Fläche verdeckt. In der Simulation nur mit dem Kabelaufbau weist die Akzeptanz des mDOM eine Inhomogenität von $(33,18 \pm 0,12) \%$ auf. Um die Homogenität der Akzeptanz des gesamten Detektoraufbaus von IceCube Upgrade aufrechtzuerhalten, könnten die Hauptdatenkabel der einzelnen Stränge zu unterschiedlichen Seiten ausgerichtet werden. In Bezug auf mögliche Änderungen am aktuellen Design der Aufhängung wurden Modifikationen an einzelnen Komponenten vorgenommen und die Auswirkungen auf die Akzeptanz des Moduls überprüft. Eine Verbreiterung des Scotch-Tape von 50 mm auf 60 mm hat demnach einen Anstieg der mittleren Abschattung der vollständigen Aufhängung von $(12,32 \pm 0,04) \%$ auf $(14,21 \pm 0,04) \%$ zur Folge, wirkt sich jedoch nicht negativ auf die Homogenität der Akzeptanz aus, da es besonders im Bereich um den Moduläquator abschattet, wo das mDOM eine besonders hohe Akzeptanz aufweist.

Eine Verschiebung des Hauptdatenkabels mittig über eine Reihe PMTs verursacht einen Anstieg der mittleren Abschattung auf $(15,13 \pm 0,04) \%$ und gleichzeitig eine Erhöhung der Inhomogenität der Winkelakzeptanz von $(37,21 \pm 0,11) \%$ auf $(39,46 \pm 0,11) \%$. Diese Werte können als obere Grenzwerte für den Einfluss einer Verschiebung des Kabels aufgefasst werden, da die simulierte Variante mit dem Kabel frontal vor einer PMT-Reihe den vermutlich ungünstigsten Fall darstellt.

Die Abschattung der Aufhängung ist abhängig von der Wellenlänge der einfallenden Photonen. Bei $\lambda = 334 \text{ nm}$ ist die Abschattung mit einem Wert von $(12,84 \pm 0,08) \%$ maximal. Die über den Raumwinkel und Wellenlängen im Bereich 300 nm - 700 nm gemittelte

Abschattung der Aufhängung beträgt $(12,39 \pm 0,01) \%$. Dies entspricht dem mittleren Verlust an detektierten Photonen durch die Aufhängung bei einer flachen Spektralverteilung einfallender Photonen. Bei Gewichtung mit dem Cherenkov-Spektrum verschiebt sich die maximale Abschattung zu kürzeren Wellenlängen. Die mittlere Abschattung weicht unter Berücksichtigung der Unsicherheiten nicht vom flachen Spektrum ab.

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Geant4-Modell der Aufhängung erweitert das bestehende Modell des mDOM und ermöglicht detailliertere Simulationen, in denen der Einfluss der Aufhängung auf die Winkelakzeptanz berücksichtigt wird. Nach genauerer Untersuchung der Reflexionseigenschaften der einzelnen Komponenten der Aufhängung könnten als nächster Schritt die in dieser Arbeit verwendeten Reflexionskoeffizienten präzisiert werden. Aufschlussreich wäre auch eine Gewichtung der Abschattung mit der von IceCube gemessenen Verteilung des Neutrinoflusses.

A Anhang

A.1 Unsicherheiten

Die bei den Simulationsergebnissen in dieser Arbeit auftretenden Unsicherheiten für die Trefferanzahl beruhen auf der Annahme, dass die simulierten Trefferanzahlen poissonverteilt sind. Die Unsicherheit der Trefferanzahl lautet:

$$U(n_{\text{det}}) = \sqrt{n_{\text{det}}}. \quad (\text{A.1})$$

Durch Fehlerfortpflanzung ergibt sich für die Unsicherheit der effektiven Fläche (vgl. Gleichung (5.1))

$$U(A_{\text{eff}}) = \frac{\sqrt{n_{\text{det}}}}{n_{\text{emit}}} A_{\text{emit}} \quad (\text{A.2})$$

und für die Unsicherheit der Abschattung (vgl. Gleichung (5.6))

$$U(S) = (1 - S) \sqrt{\frac{1}{n_{\text{det}}} + \frac{1}{n_{\text{det,ref}}}}, \quad (\text{A.3})$$

wobei $n_{\text{det,ref}}$ und n_{det} die Anzahl detektierter Photonen ohne bzw. mit Aufhängung sind. Die Unsicherheit der Inhomogenität (vgl. Gleichung (5.7)) kann mit

$$U(I) = (1 - I) \sqrt{\frac{1}{n_{\text{det,max}}} + \frac{1}{n_{\text{det,min}}}} \quad (\text{A.4})$$

berechnet werden. Dabei sind $n_{\text{det,min}}$ und $n_{\text{det,max}}$ die minimale bzw. maximale Anzahl detektierter Photonen. Die mit Gleichung (5.4) berechnete mittlere effektive Fläche hat die Unsicherheit

$$U(\bar{A}_{\text{eff}}) = \frac{1}{N} \frac{A_{\text{emit}}}{n_{\text{emit}}} \sqrt{\sum_{\varphi=0^\circ}^{360^\circ} \sum_{\vartheta=0^\circ}^{180^\circ} n_{\text{det}}(\vartheta, \varphi) \sin^2 \vartheta}. \quad (\text{A.5})$$

In den meisten Abbildungen werden die Unsicherheiten nicht mit angegeben, da sie kleiner sind als die Linienbreite der Simulationsdaten.

A.2 3-Seil-Aufbau

Eine Aufhängung an drei anstelle von vier Seilen, wie in Abb. A.1 (rechts) dargestellt, käme für das Design der Aufhängung infrage, weil drei Seile ausreichen, um das mDOM in seiner Position zu fixieren. Der Verlauf der Abschattung in φ ist in Abb. A.2 für beide Varianten dargestellt. Die Struktur der Abschattung verändert sich, da in der 3-Seil-Variante zwei der Seile über PMTs liegen. Über den gesamten Raumwinkel betrachtet unterscheidet sich die Abschattung der 3-Seil-Variante unter Berücksichtigung des 68%-Konfidenzbereichs nicht vom 4-Seil-Aufbau (vgl. Tabelle A.1).

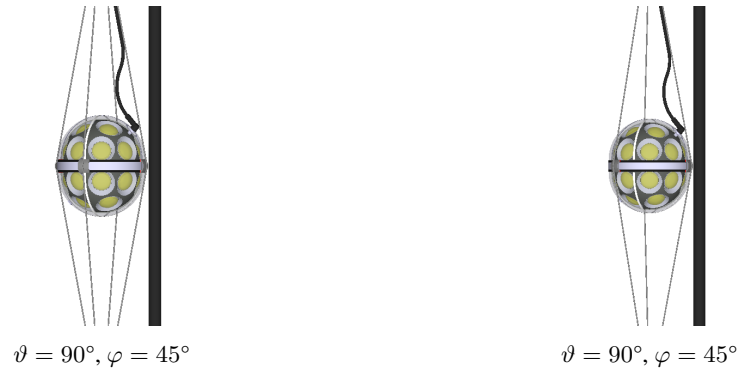


Abbildung A.1: Links: Aufhängung mit 4 Seilen und Brücken. Rechts: Aufhängung mit 3 Seilen und Brücken. In beiden Varianten sind die Seile und Brücken jeweils gleichmäßig um das Modul verteilt.

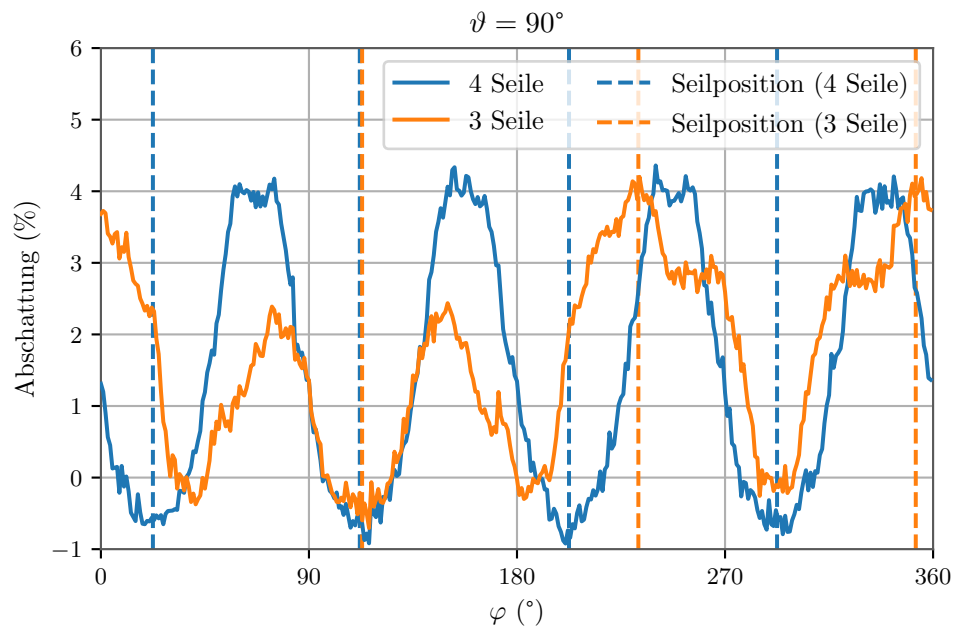


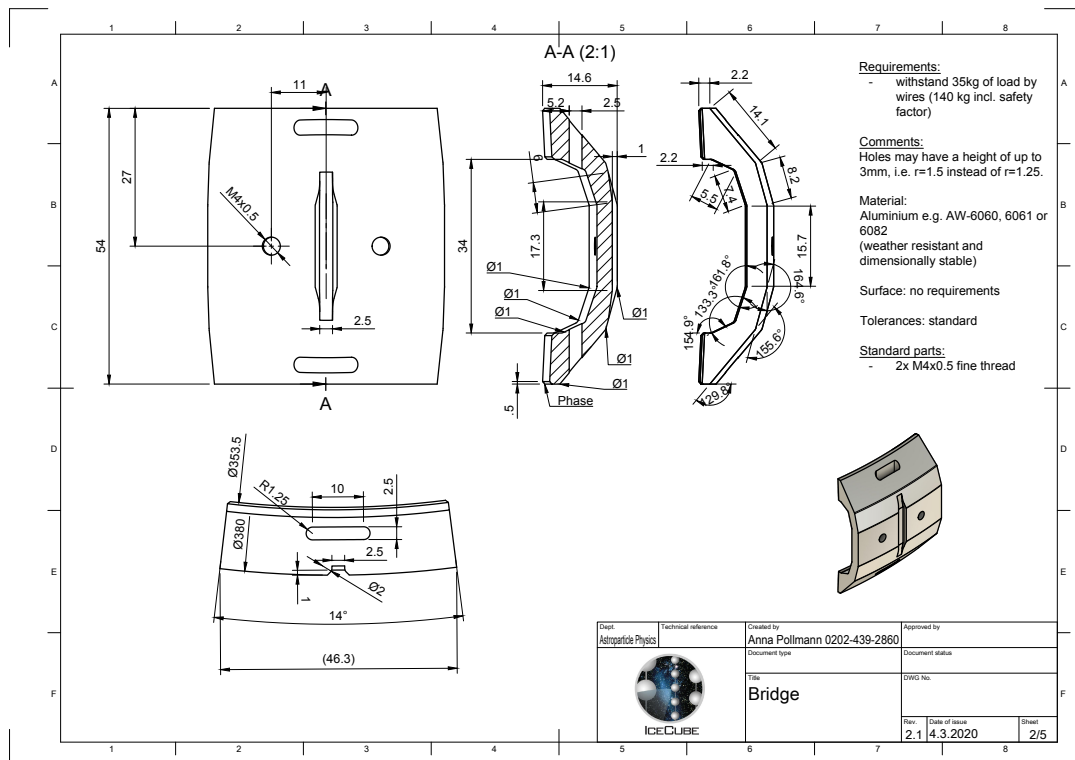
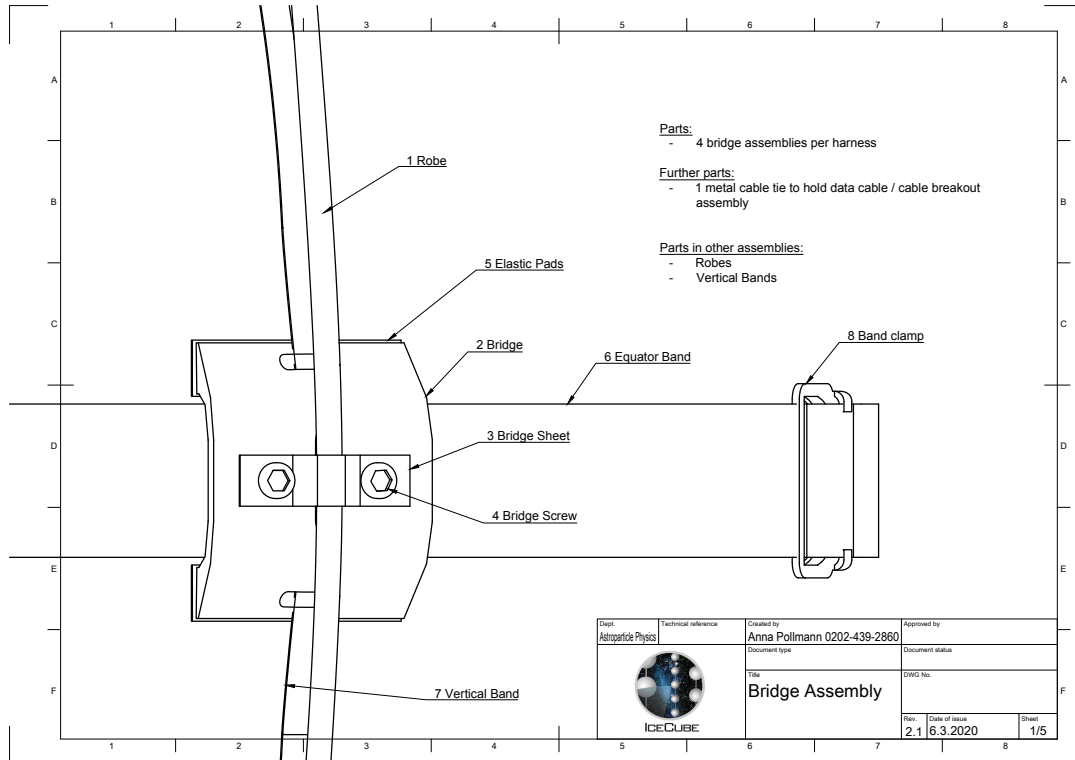
Abbildung A.2: Vergleich der Abschattung der 3- und 4-Seil-Lösung in der Komponentengruppe nur mit Seilen und Brücken. Die Symmetrie verändert sich in der 3-Seil-Lösung gegenüber 4 Seilen. Zwei der Abschattungsmaxima befinden sich an den Seilpositionen, da diese Seile über PMTs verlaufen und somit bei frontalem Einfall von Photonen am meisten photosensitive Fläche verdecken.

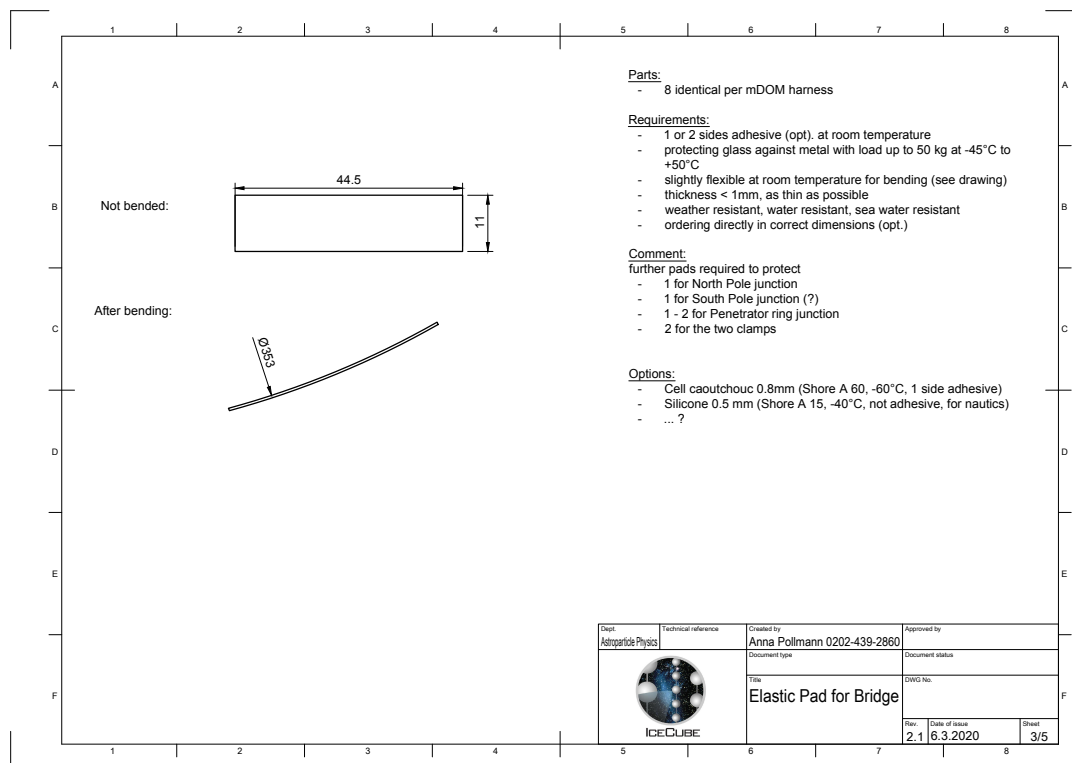
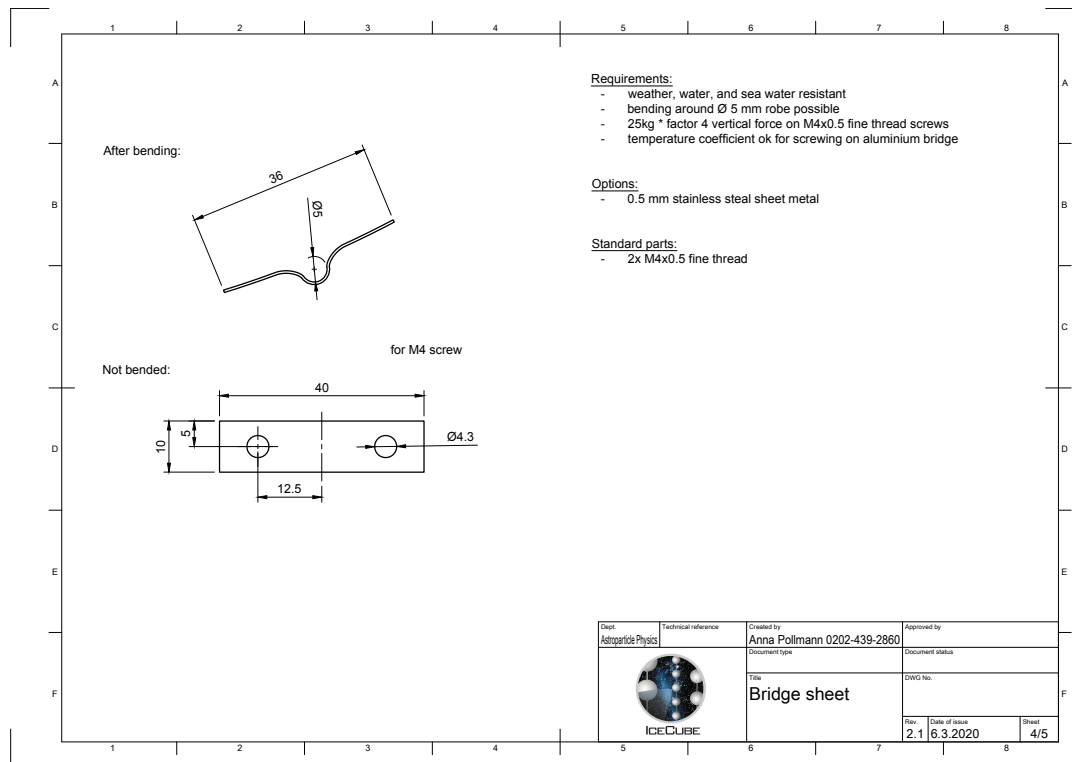
Tabelle A.1: Über den gesamten Raumwinkel gemittelt unterscheiden sich beide Varianten nur geringfügig voneinander. In der kompletten Aufhängung ist die 3-Seil-Variante günstiger hinsichtlich Abschattung und Homogenität.

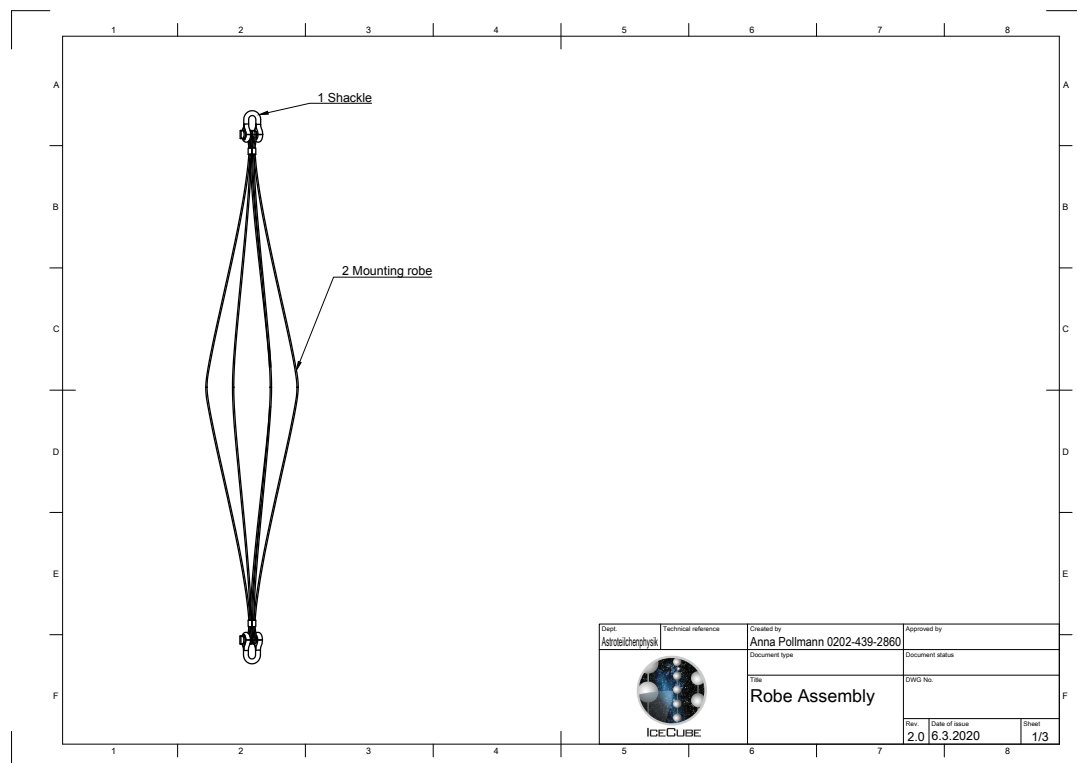
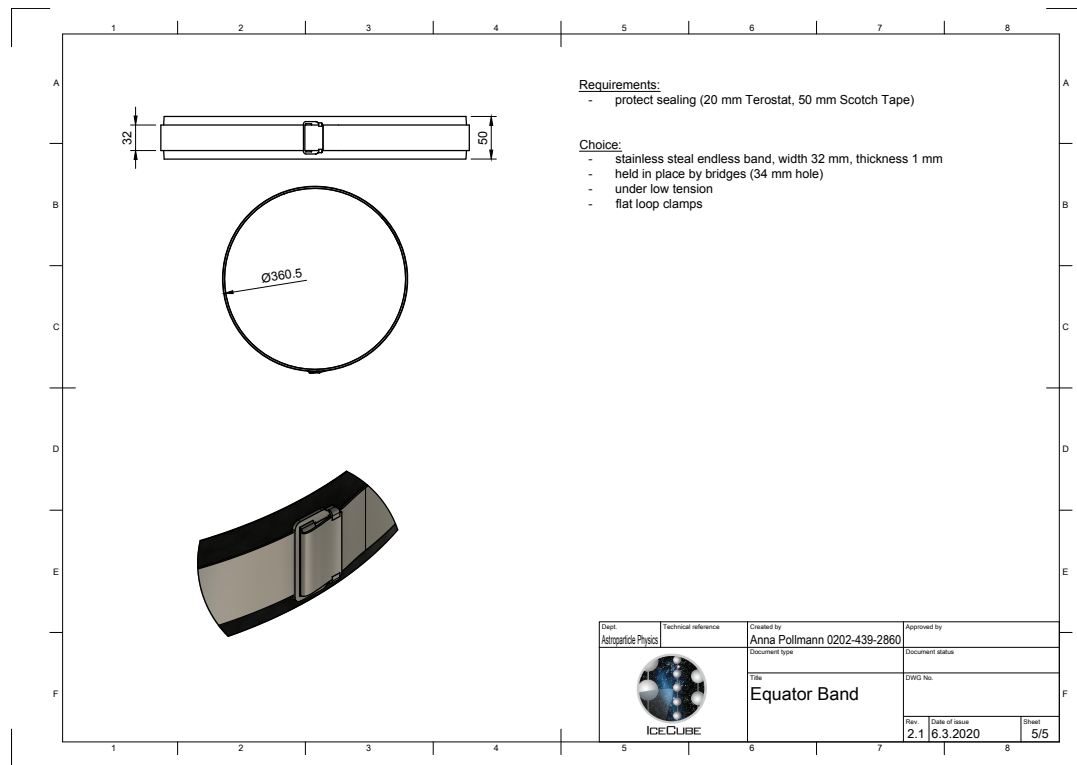
Konfiguration	Anzahl Seile	$\bar{A}_{\text{eff}} (\text{cm}^2)$	$S (\%)$	$I (\%)$
Seile und Brücken	4	$380,20 \pm 0,09$	$2,24 \pm 0,04$	$17,24 \pm 0,14$
	3	$380,12 \pm 0,09$	$2,26 \pm 0,04$	$16,19 \pm 0,14$
Komplettes Modell	4	$341,03 \pm 0,09$	$12,32 \pm 0,04$	$37,21 \pm 0,11$
	3	$341,34 \pm 0,09$	$12,24 \pm 0,04$	$36,09 \pm 0,12$

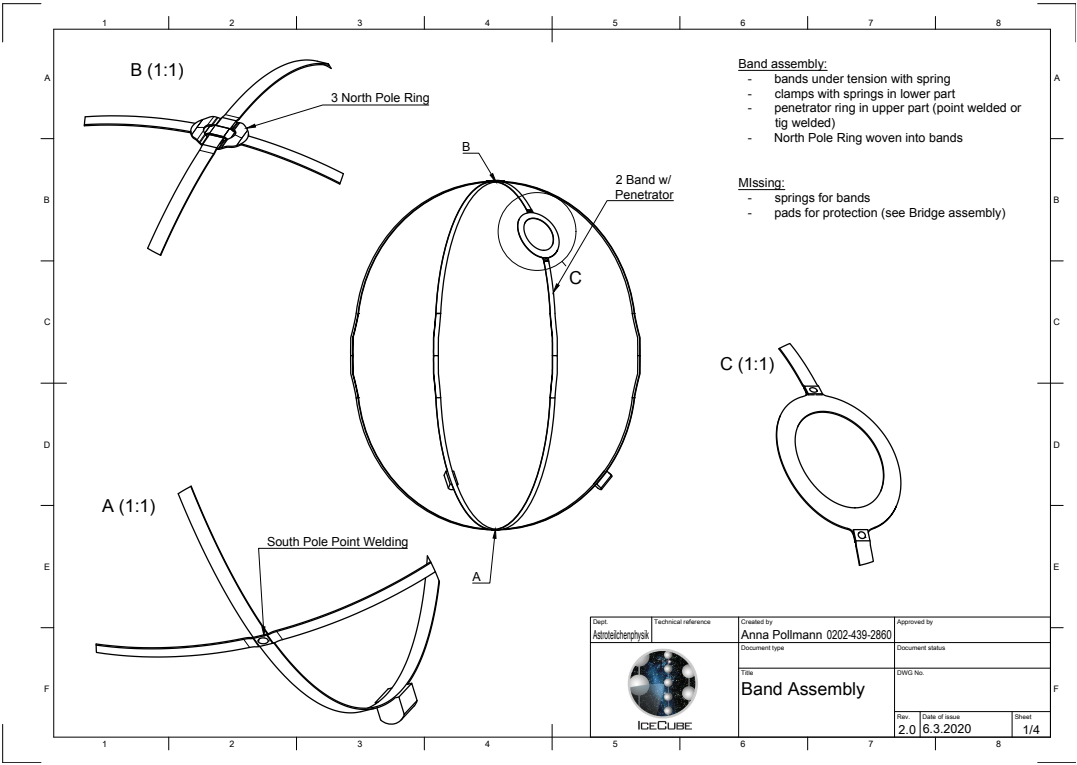
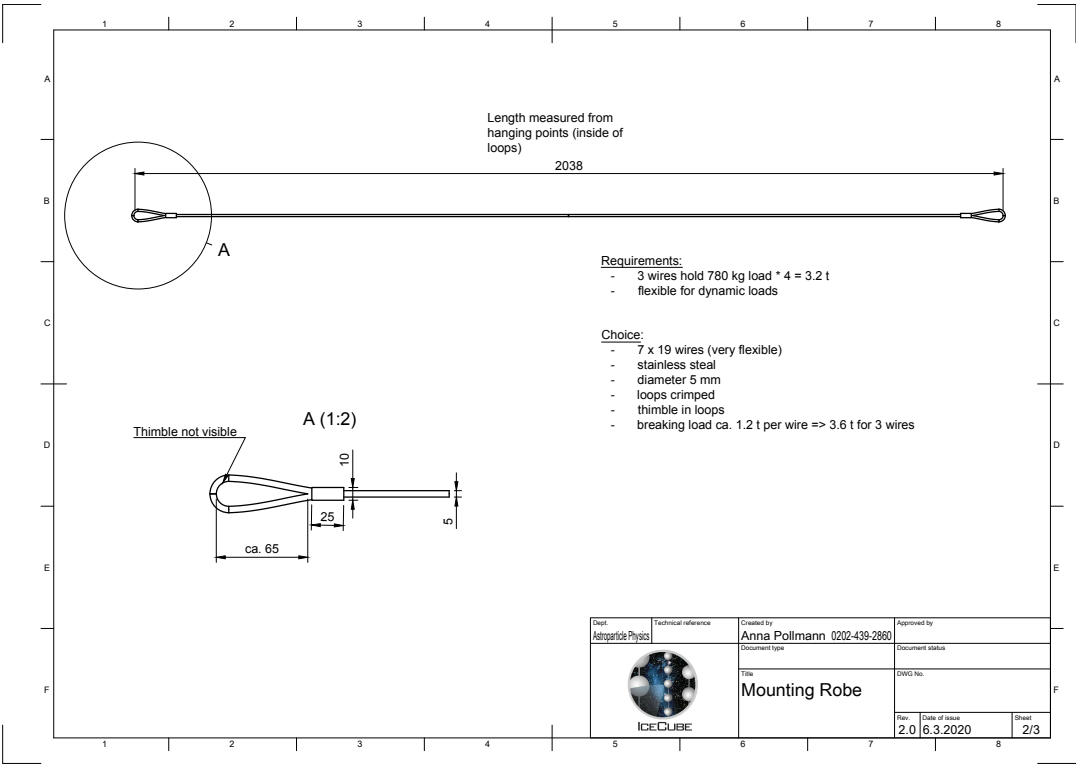
A.3 Skizzen der Aufhängung

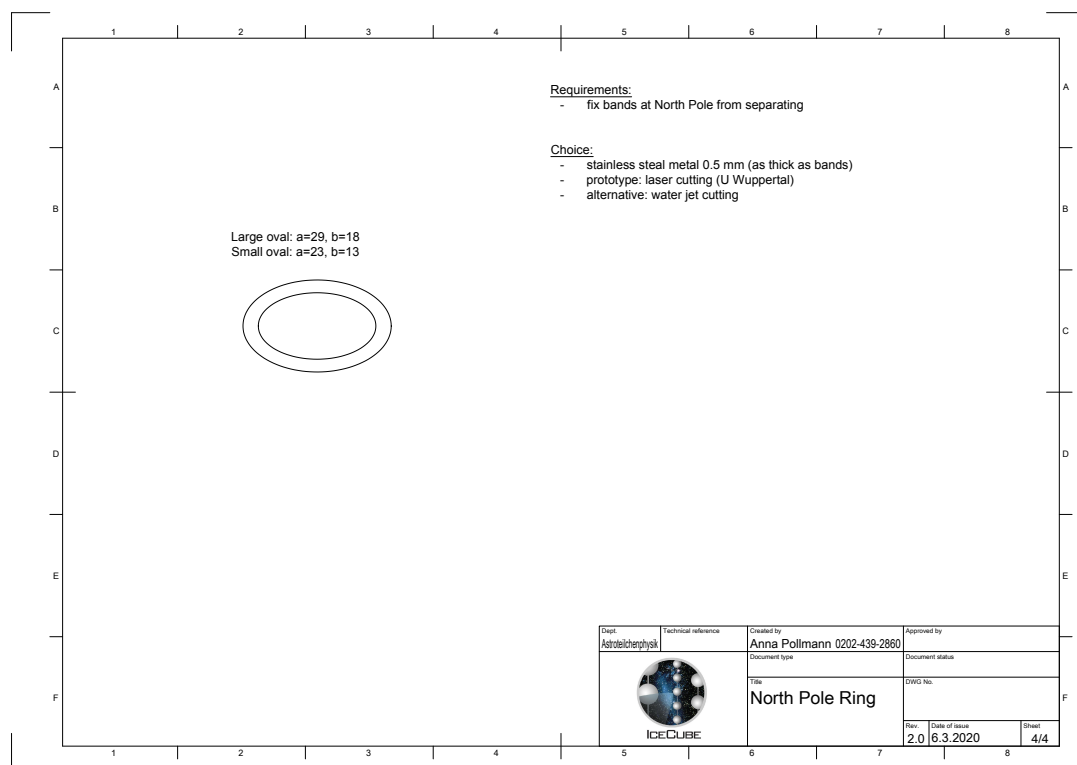
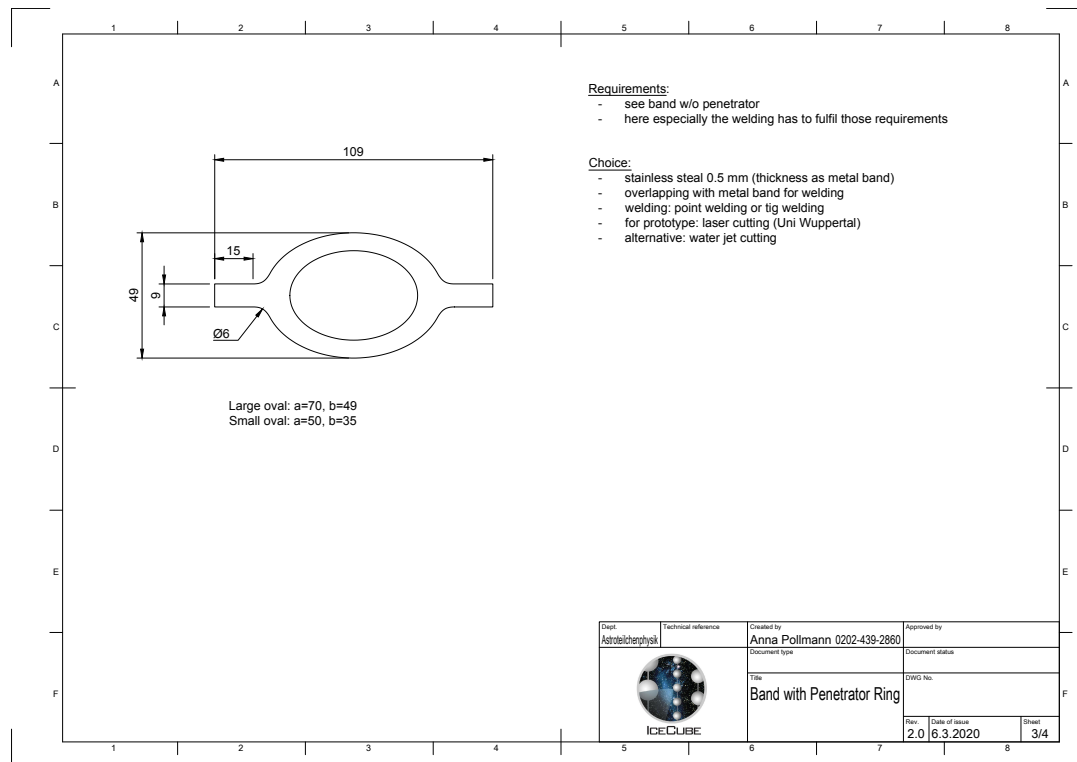
Im Folgenden sind einige der zur Modellierung der Modulaufhängung verwendeten Konstruktionszeichnungen dargestellt. Diese wurden von Anna Pollmann aus der IceCube-Gruppe der Universität Wuppertal bereitgestellt.











Literatur

- [1] U.F. Katz und Ch. Spiering. „High-energy neutrino astrophysics: Status and perspectives“. In: *Progress in Particle and Nuclear Physics* 67.3 (2012), 651–704. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2011.12.001.
- [2] M. G. Aartsen u. a. „First Observation of PeV-Energy Neutrinos with IceCube“. In: *Phys. Rev. Lett.* 111 (2 2013). DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.021103.
- [3] IceCube Collaboration u. a. „Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A“. In: *Science* 361.6398, eaat1378 (Juli 2018), eaat1378. DOI: 10.1126/science.aat1378. arXiv: 1807.08816 [astro-ph.HE].
- [4] Lew Classen. „The mDOM – a multi-PMT digital optical module for the IceCube-Gen2 neutrino telescope“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [5] M. Aker u. a. „Improved Upper Limit on the Neutrino Mass from a Direct Kinematic Method by KATRIN“. In: *Physical Review Letters* 123.22 (2019). ISSN: 1079-7114. DOI: 10.1103/physrevlett.123.221802.
- [6] W. Demtröder. *Experimentalphysik 4*. Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-21476-9.
- [7] Christian Spiering. *Neutrinos - unsichtbare Himmelsboten*. URL: <https://www-zeuthen.desy.de/~cssprier/www/buecher/Unsichtbare-Himmelsboten.pdf>.
- [8] Claus Grupen u. a. *Astroparticle physics*. Bd. 50. Springer, 2005.
- [9] P. A. Cherenkov. „Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding that of Light“. In: *Phys. Rev.* 52 (4 1937), S. 378–379. DOI: 10.1103/PhysRev.52.378. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.52.378>.
- [10] Hermann Kolanoski und Norbert Wermes. *Teilchendetektoren*. Springer, 2016.
- [11] 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.
- [12] I. Frank und Ig. Tamm. „Coherent Visible Radiation of Fast Electrons Passing Through Matter“. In: *Selected Papers*. Hrsg. von Boris M. Bolotovskii, Victor Ya. Frenkel und Rudolf Peierls. Springer Berlin Heidelberg, 1991. DOI: 10.1007/978-3-642-74626-0_2.
- [13] IceCube Collaboration. *Schematische Darstellung des IceCube Neutrinoobservatoriums*. Zuletzt aufgerufen am 23.12.2020. URL: <http://gallery.icecube.wisc.edu/web/var/albums/Press-Root-Album/Detector/ArrayWSeasonsLabelsAmanda.jpg>.
- [14] M.G. Aartsen u. a. „The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems“. In: *Journal of Instrumentation* 12.03 (2017), P03012–P03012. ISSN: 1748-0221. DOI: 10.1088/1748-0221/12/03/p03012. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/P03012>.

- [15] Francis Halzen und Spencer R. Klein. „Invited Review Article: IceCube: An instrument for neutrino astronomy“. In: *Review of Scientific Instruments* 81.8 (2010). DOI: 10.1063/1.3480478.
- [16] Christian Haack. *Detection of a Neutrino Event at the Glashow Resonance Energy in IceCube*. EPS-Meeting, Ghent, 2019. URL: https://indico.cern.ch/event/577856/contributions/3422129/attachments/1878315/3093790/Detection_of_a_Neutrino_Event_at_the_Glashow_Resonance_Energy_in_IceCube.pdf.
- [17] J. L. Kelley und IceCube Collaboration. „Event triggering in the IceCube data acquisition system“. In: *AIP Conference Proceedings* 1630.1 (2014), S. 154–157. DOI: 10.1063/1.4902795.
- [18] Gen2 Collaboration u. a. *IceCube-Gen2: The Window to the Extreme Universe*. 2020. arXiv: 2008.04323 [astro-ph.HE].
- [19] Aya Ishihara. *The IceCube Upgrade – Design and Science Goals*. 2019. arXiv: 1908.09441 [astro-ph.HE].
- [20] Lew Classen u. a. „The mDOM - A multi-PMT digital optical module for the IceCube-Gen2 neutrino telescope“. In: *PoS ICRC2017* (2017), S. 1047. DOI: 10.22323/1.301.1047.
- [21] *mDOM Harness DSN*.
- [22] S. Agostinelli u. a. „Geant4 – a simulation toolkit“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506.3 (2003), 250–303. ISSN: 0168-9002. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.
- [23] Geant4 Collaboration. *Geant4 Book For Application Developers – Solids*. Zuletzt aufgerufen am 20.12.2020. URL: <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/BackupVersions/V10.6c/html/Detector/Geometry/geomSolids.html>.
- [24] Tabea Maria Eder. *Simulationsstudien zum Untergrund durch radioaktive Zerfälle in einem optischen Modul mit mehreren Photomultipliern für IceCube-Gen2*. Bachelorarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2016.
- [25] 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, 2019.
- [26] Jennifer L. Marshall u. a. „Characterization of the reflectivity of various black materials“. In: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*. Hrsg. von Suzanne K. Ramsay, Ian S. McLean und Hideki Takami. Bd. 9147. International Society for Optics und Photonics. SPIE, 2014, 1459 – 1466. DOI: 10.1117/12.2056729.
- [27] Jyothi Jambu u. a. „Optical properties of TiAlC/TiAlCN/TiAlSiCN/TiAlSiCO/TiAlSiO tandem absorber coatings by phase-modulated spectroscopic ellipsometry“. In: *Applied Physics A* 123 (Juni 2017). DOI: 10.1007/s00339-017-1103-2.
- [28] M Donabedian. „Reflectance and emittance of selected materials and coatings[Final Report]“. In: (1975). URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a004080.pdf>.

Danksagung

An dieser Stelle will ich allen Personen danken, die mich beim Schreiben dieser Arbeit unterstützt haben. Mein Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr. Kappes, der mir durch Aufnahme in seine Arbeitsgruppe viele neue Perspektiven auf das Feld der Physik geboten und die Arbeit an einem interessanten Thema als Gegenstand aktueller Forschung ermöglicht hat. Danke, dass Sie mir die Chance gegeben haben, die Ergebnisse dieser Arbeit auch außerhalb der Arbeitsgruppe vorzustellen. Mein Dank gilt auch Herrn Dr. Hannen, der sich dazu bereit erklärt hat, die Aufgabe des Zweitgutachters dieser Arbeit zu übernehmen.

Der gesamten Arbeitsgruppe möchte ich für die stets gute Atmosphäre danken. Besonders danken will ich Dr. Lew Classen, der mich bei dieser Arbeit betreut und den Text korrekturgelesen hat. Danke für jedes Gespräch mit Dir, denn alle davon waren hilfreich und motivierend zugleich. Viel zu verdanken habe ich auch Markus Dittmer wegen seiner permanenten Hilfsbereitschaft und zahlreicher Mensa-Gespräche. Deine Korrekturen meiner Arbeit waren mir eine große Hilfe. Ein großer Dank geht auch an Martin Unland für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Also, I would like to express my gratitude to Cristian Lozano Mariscal, who helped me with everything related to the cluster. Mein Dank gilt auch Dr. Anna Pollmann, die durch das Bereitstellen wichtiger Unterlagen das Fundament für meine Arbeit gelegt hat. An dieser Stelle möchte ich auch allen meinen Freunden danken, mit denen ich die wenigen Minuten, in denen ich nicht an diese Arbeit gedacht habe, verbringen durfte. Ich danke meinem Vater für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Mama und Christof, danke dass Ihr mich in allem unterstützt, was ich tue.

Und danke Lea, dass Du immer an meiner Seite bist. Ich verdanke Dir eine Menge.