Westfälische
Wilhelms-Universität
Münster

Bachelorarbeit

Studien zur Optimierung der Detektorkalibration mit atmosphärischen Myonen bei KM3NeT/ORCA unter Verwendung einzelner vertikaler Detektoreinheiten

Gutachter:
Alexander Kappes
Christian Klein-Bösing

vorgelegt von
Tim Stellhorn

Wissenschaftliche Arbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science

in der

AG Kappes
Institut für Kernphysik

— Juli 2020 —

„Space: the final frontier.“
- James T. Kirk

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation **4**

2 Physikalische Grundlagen **5**
2.1 Neutrinos im Standardmodell 5
2.2 Sekundäre kosmische Strahlung 6
2.3 Detektion von Cherenkov-Licht 8
2.4 KM3NeT - Kubikkilometer-Neutrino-Teleskop 9

3 Datenverarbeitung und Rekonstruktion mit KM3NeT **11**
3.1 Datenaufnahme 11
3.2 Rekonstruktion von Spurereignissen 11
3.3 Kalibrationsmethoden 12

4 Studien zur Längenkalibration einzelner DUs **15**
4.1 Motivation für Studien an einzelnen DUs 15
4.2 Abhängigkeit des Streckungsfaktors vom Polarwinkel 19
4.3 Filter zur Ereignisselektion 25
4.3.1 Anzahl an DOMs mit getriggerten Treffern 25
4.3.2 Anzahl getriggerter Treffer in einem Ereignis 27
4.4 Analyse realer Daten 29

5 Studien zur Zeitkalibration einzelner DUs **31**
5.1 Motivation für Studien an einzelnen DUs 31
5.2 Berechnung der Zeitresiduen einzelner DUs 32
5.3 Ereignisselektion nach der Anzahl an getriggerten Treffern 35
5.4 Möglichkeiten zur Bestimmung des Inter-DOM-Zeitoffsets 36

6 Zusammenfassung und Ausblick **38**

Literatur **39**

1 Einleitung und Motivation

Von den unendlichen Weiten des Weltraums hat die Menschheit bis heute nur die nächste Umgebung ihres Planeten erforscht. Und so lange wir noch nicht auf einem Raumschiff in fremde Galaxien vordringen können, die nie ein Mensch zuvor gesehen hat, müssen wir unsere Informationen über neue Welten aus etwas gewinnen, was zu uns auf die Erde kommt.
Im sichtbaren Spektrum haben die Menschen den Himmel schon seit Jahrtausenden beobachtet. Mit der Neutrinoastronomie bietet sich nun eine völlig neue Möglichkeit, das Universum auf andere Art und Weise zu betrachten. Neutrinos koppeln nicht an die elektromagnetische Wechselwirkung und werden daher auf dem Weg von ihrer Quelle zur Erde nicht abgelenkt. Durch die Detektion der Energie und der Richtung von hochenergetischen Neutrinos können daher mehr Informationen über deren extrasolare Quellen wie Supernovae oder schwarze Löcher gewonnen werden.
Doch die geringe Wechselwirkungsrate von Neutrinos stellt auch ein Problem bei deren Detektion dar. Um ausreichend Neutrinointeraktionen messen zu können, bedarf es eines Detektors mit einer möglichst großen Fläche. Dafür wird im Mittelmeer das Kubikkilometer-Neutrino-Teleskop (KM3NeT) aufgebaut.
Der Detektor bei KM3NeT besteht aus mehreren Strängen mit photosensitiven Messgeräten zur Detektion von Licht. Damit können geladene Teilchen, die sich schneller als Licht im Medium bewegen, detektiert werden. Aus den gemessenen Daten kann dann die bei einer Neutrinointeraktion ausgelöste Spur von Sekundärteilchen rekonstruiert werden. Dafür ist allerdings eine präzise Kalibration des Detektors notwendig, welche durch verschiedene Methoden erreicht werden kann. Neben konventionellen Methoden mittels akustischer oder optischer Positionsbestimmung gibt es weiterhin die Möglichkeit, die Kalibration mithilfe rekonstruierter Spuren von in der Atmosphäre entstandenen Myonen zu optimieren.
In dieser Arbeit werden auf diesen Daten basierende Simulationen zur Optimierung der Kalibration des Detektors durchgeführt. Dabei wird vor allem die Rekonstruktion mit Daten eines einzelnen vertikalen Detektorstrangs im Vergleich zur Rekonstruktion der Daten des ganzen Detektors untersucht. Die Auswirkungen dessen auf die Kalibration wird anhand von zwei Beispielen studiert.

2 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die physikalischen Prozesse erklärt, die der Detektion von Teilchen bei KM3NeT zugrunde liegen. Dazu werden zunächst Neutrinos und Myonen im Rahmen des Standardmodells betrachtet und es wird beschrieben, wie es bei der Interaktion mit Materie zur Emission von Cherenkov-Licht kommt. Weiterhin wird KM3NeT und im Speziellen der ORCA-Detektor vorgestellt.

2.1 Neutrinos im Standardmodell

Das Standardmodell fasst die Eigenschaften der uns bekannten Elementarteilchen zusammen. Dabei wird zwischen Austauschteilchen (Bosonen) und Materieteilchen (Fermionen) unterschieden. Neutrinos sind Fermionen und gehören zudem zur Gruppe der Leptonen. Als solche haben sie einen halbzahligen Spin. Außerdem sind sie neutral geladen und besitzen eine von null verschiedene, sehr geringe Masse.

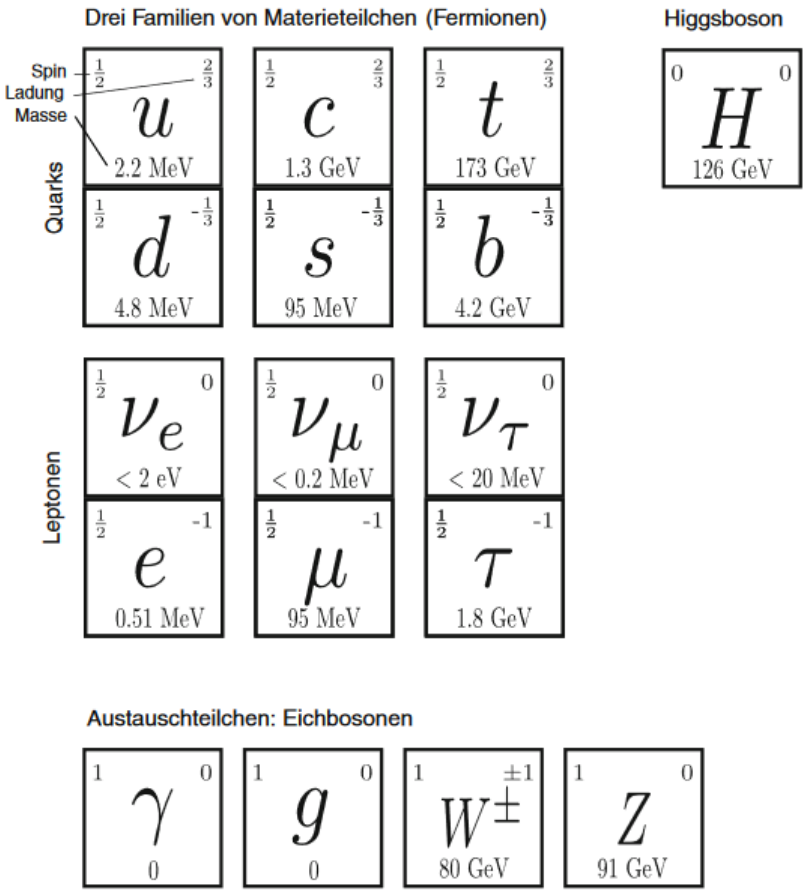

Abbildung 1: Übersicht der Elementarteilchen im Standardmodell, aufgeteilt nach Fermionen und Bosonen. Entnommen aus [1].

In Abb. 1 ist eine Übersicht des Standardmodells angegeben. Dabei lässt sich erkennen, dass es drei Familien von Neutrinos gibt: die Elektron-, Myon- und Tauneutrinos.
Postuliert wurde das Neutrino im Jahr 1930 von Wolfgang Pauli in einem Brief an die „lieben radioaktiven Damen und Herren“ einer Konferenz in Tübingen, um im Rahmen des Betazerfalls die Energie- und Drehimpulserhaltung sicherzustellen. Erst im Jahr 1956 gelang der erste experimentelle Nachweis eines Elektron-Antineutrinos durch Reines und Cowan über einen inversen Betazerfall [2]. Experimentelle Nachweise von Myon- und Tauneutrinos gelangen in den Jahren 1962 und 2001 in den USA [3] [4].
Als Leptonen unterliegen die Neutrinos nicht der starken Wechselwirkung. Aufgrund ihrer neutralen Ladung wechselwirken sie außerdem als einzige Fermionen nicht elektromagnetisch und ihre geringe Masse führt dazu, dass die gravitative Wechselwirkung im Allgemeinen vernachlässigt werden kann. Somit wirkt auf Neutrinos nur die schwache Wechselwirkung, deren Kopplungskonstante um einige Größenordnungen geringer ist als die der starken oder der elektromagnetischen Wechselwirkung. Dies stellt eine besondere Herausforderung im Nachweis von Neutrinos dar.
Es gibt verschiedene physikalische Prozesse, bei denen Neutrinos entstehen. Dazu gehören, wie bereits erwähnt, der Betazerfall oder die Fusionsprozesse in Sternen sowie die Explosion einer Supernova. Am Ende seiner Lebensdauer wird ein Stern bei genügend hoher Masse instabil und fällt in sich zusammen. Durch den Aufprall auf den Kern wird die äußere Hülle in einer Schockwelle abgestoßen, wobei Teilchen beschleunigt werden und u.a. in Neutrinos zerfallen. Der Kern bleibt als Neutronenstern oder schwarzes Loch zurück.
Eine Quelle für hochenergitische Neutrinos im TeV-Bereich stellen beispielsweise Doppelsternsysteme dar, bei denen ein Pulsar um einen Begleitstern kreist. Außerdem emittiert ein supermassereiches schwarzes Loch durch seinen Drehimpuls Teilchenjets senkrecht zur Akkretionsscheibe. [5] [6]
Für den in dieser Arbeit betrachteten ORCA-Detektor sind allerdings niederenergetische Neutrinos ($\approx GeV$) von Bedeutung. Auf deren Entstehung wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

2.2 Sekundäre kosmische Strahlung

Wie Neutrinos gehören auch die Myonen im Standardmodell zur Gruppe der Leptonen. Wie Abb. 1 zeigt, haben sie einen halbzahligen Spin und sind negativ geladen. Sie besitzen außerdem eine deutlich höhere Ruhemasse als Neutrinos. Diese Eigenschaften haben zur Folge, dass es deutlich häufiger zu Wechselwirkungen mit der Umgebung kommt.
Für die Detektion mit KM3NeT sind besonders die atmosphärischen Myonen relevant. Dieses entstehen als Sekundärteilchen beim Auftreffen hochenergetischer kosmischer Strahlung auf die Atmosphäre, welche zum Großteil aus Protonen besteht.
Wenn ein primäres Proton in die Atmosphäre eintritt, interagiert es mit der Luft und erzeugt Δ^+-Baryonen, welche sehr schnell hauptsächlich in sekundäre Pionen zerfallen.

Diese sind mit einer Lebensdauer von 26 ns ebenfalls sehr kurzlebig und zerfallen je nach Ladung in Photonen oder Myonen und Myonneutrinos gemäß Gleichung (1).

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma, \qquad \pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \qquad \pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu_\mu} \tag{1}$$

Die so entstehenden Myonen sind um einiges langlebiger und bilden mit 80 % den Großteil der sekundären Teilchen, die den Boden erreichen. Nach Gleichung (1) stellen die Reaktionen der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre außerdem eine Quelle für niederenergetische Neutrinos dar. [6]
Eine Veranschaulichung des gesamten Prozesses ist in Abb. 2 gegeben.

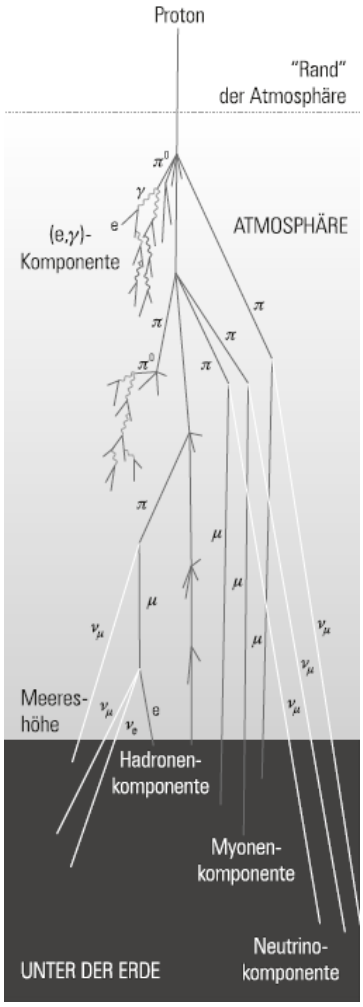

Abbildung 2: Erzeugung von sekundärer kosmischer Strahlung. Die entstehenden Pionen teilen sich in mehrere Komponenten auf. π^0-Mesonen reultieren in elektromagnetische Schauer und geladene Pionen erzeugen Myonen und Myonneutrinos. Entnommen aus [6] (S.204).

2.3 Detektion von Cherenkov-Licht

Eine Möglichkeit des Nachweises von Neutrinos ist die Detektion der bei Wechselwirkungen entstehenden Sekundärteilchen. Diese können, wie in Abb. 3 dargestellt, durch ausgesandtes Cherenkov-Licht gemessen werden. Auf diese Weise können ebenfalls atmosphärische Myonen detektiert werden.

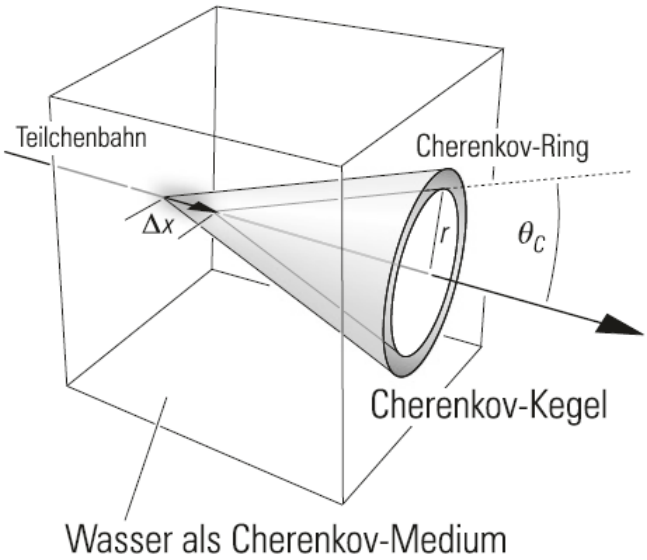

Abbildung 3: Darstellung der Erzeugung eines Cherenkov-Lichtkegels in Wasser. Entnommen aus [6] (S.73).

Cherenkov-Licht wird ausgesandt, wenn geladene Teilchen sich schneller als Licht in einem Medium bewegen. Durch die Bewegung werden die Atome des Mediums entlang der Flugbahn polarisiert. Die von diesen Dipolen emittierte Strahlung interferiert im Allgemeinen destruktiv. Erst ab einer Geschwindigkeit $v > \frac{c}{n}$ des bewegten Teilchens ergibt sich eine Wellenfront. Dieses Licht wird kegelförmig unter einem Winkel θ_C zur Bahn des Teilchens ausgesandt. Gleichung (2) gibt die Anzahl an Photonen mit Wellenlängen zwischen 400 nm und 700 nm an, die pro cm erzeugt werden. Dabei beschreibt z die Ladung des bewegten Teilchens.

$$N = 490 \cdot z^2 \cdot \sin^2(\theta_C)[cm^{-1}] \tag{2}$$

Zur Detektion des Cherenkov-Lichts können zB. Photomultiplier (PMTs) verwendet werden. Da im Wasser allerdings nur 220 Photonen pro cm erzeugt werden, muss jegliches Untergrundlicht möglichst unterdrückt werden. [6]

2.4 KM3NeT - Kubikkilometer-Neutrino-Teleskop

KM3NeT ist ein Neutrinoteleskop im Mittelmeer, das sich zurzeit im Aufbau befindet. Es wird an zwei verschiedenen Standorten vor der französischen und italienischen Küste geplant.
Die Bestandteile des Telekops verfolgen verschiedene physikalische Ziele. Auf der einen Seite erwartet man mehr Informationen über Quellen von hochenergetischen Neutrinos im Universum. Dazu wird 100 km von der sizilianischen Küste entfernt der ARCA-Detektor („Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss“) aufgebaut. Seine Aufgabe ist die Detektion von hochenergetischen kosmischen Neutrinos.
Auf der anderen Seite werden mit KM3NeT auch die Eigenschaften von Neutrinos untersucht. Im Fokus stehen dabei die Bestimmung der Neutrinomassenhierarchie und der Oszillationsparameter. Darauf optimiert ist der ORCA-Detektor („Oscillation Research with Cosmics in the Abyss“), welcher 40 km vor der französischen Küste nahe Toulon errichtet wird. Er ist auf die Studien von niederenergetischen Neutrinos spezialisiert, welche durch Reaktionen von kosmischer Strahlung in der Erdatmosphäre entstehen.

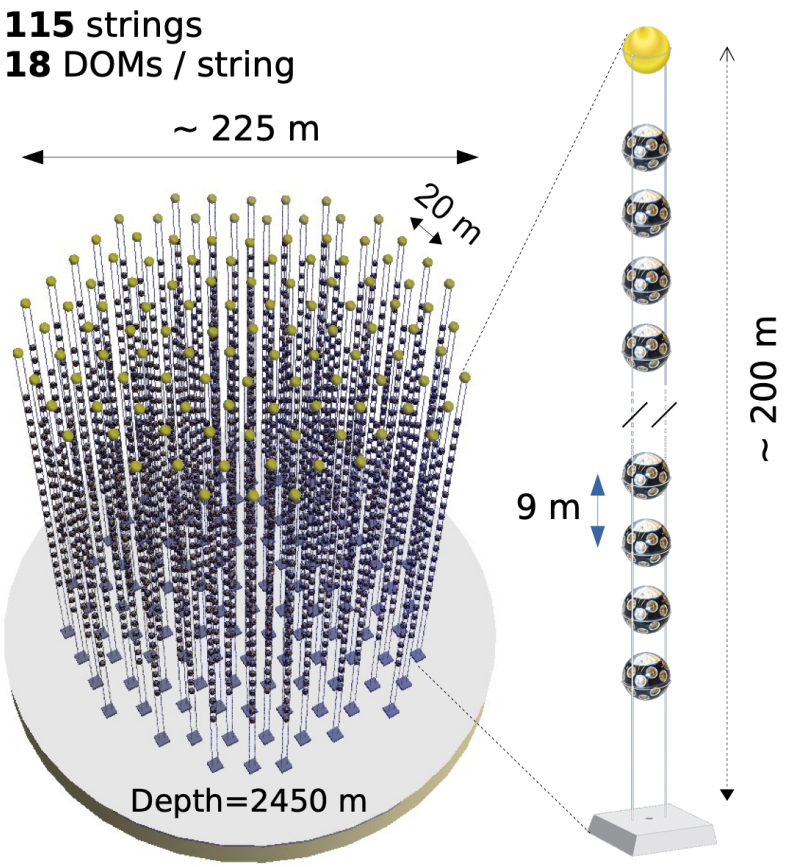

Abbildung 4: Schematischer Aufbau des KM_3NeT/ORCA-Detektors. Entnommen aus [8].

In Abb. 4 ist der KM3NeT/ORCA-Detektor dargestellt. Er ist einer von drei Detektoren, die jeweils 115 sogenannte Detektionseinheiten (engl. „detection unit“, kurz: DU) beinhalten werden. Dies sind vertikal orientierte Ketten, an denen je 18 „digitale optische Module“ (DOMs) befestigt sind. Bei den DOMs handelt es sich um Glaskugeln, in denen 31 PMTs zur Registrierung von Cherenkov-Licht angebracht sind, wie Abb. 5 verdeutlicht. Eine PMT misst dabei für jeden Treffer den Startzeitpunkt und die Dauer, die das ausgegebene Spannungssignal sich über einer bestimmten Schwelle befindet. Durch ein Glasfaserkabel werden diese Daten an die Küste übertragen. In jedem DOM ist außerdem eine Leuchtdiode (LED), ein Kompass und ein akustischer Sensor verbaut, die zur Kalibration der Messgeräte dienen.

Abbildung 5: DOM mit 31 PMTs in einer Glaskugel und Kabel zur Übertragung von Daten. Entnommen aus [7].

Bei ORCA sind die 18 DOMs einer DU jeweils in einem Abstand von 9 m zueinander angebracht, welche somit über eine Strecke von 160 m auf der DU verteilt sind. Die DUs sind mit einem Abstand von 20 m zueinander und in einer Tiefe von 2450 m angebracht, um Untergrundlicht und den Untergrund an atmosphärischen Myonen zu minimieren. Beim ARCA-Detektor, welcher auf der gleichen Technik basiert, ist der vertikale Abstand zwischen den DOMs mit 36 m und der horizontale Abstand zwischen den DUs mit 90 m deutlich größer. Er ist außerdem in einer Tiefe von 3500 m angebracht.
Zur Installation einer DU im Wasser wird das „Launching vehicle of Optical Modules“ (LOM) verwendet. Damit wird die DU zunächst an Land aufgerollt und am Meeresgrund wieder entrollt. Dort löst sich das LOM und ein Anker hält das Ende der DU am Boden, während der restliche Strang durch seinen Auftrieb vertikal ausgerichtet wird.
In einer ersten Konstruktionsphase des ORCA-Detektors wurden bereits sechs der 115 geplanten DUs installiert. [7]

3 Datenverarbeitung und Rekonstruktion mit KM3NeT

Als nächstes wird beschrieben, wie bei KM3NeT Teilcheninteraktionen detektiert und rekonstruiert werden. Danach wird auf verschiedene Schritte zur Kalibration des Detektors eingegangen.

3.1 Datenaufnahme

Wenn eine PMT Licht detektiert, dessen Intensität eine bestimmte Schwelle überschreitet, wird dies als Treffer definiert. Werden auf mehreren PMTs in räumlicher und zeitlicher Koinzidenz eine bestimmte Anzahl an Treffern gemessen, dann werden die auslösenden Treffer als gemeinsames Ereignis definiert und fortan als getriggerte Treffer bezeichnet. Dabei kann es auch passieren, dass ein Teil der Treffer seinen Ursprung nicht in einer Teilcheninteraktion hat, sondern auf Untergrundereignisse zurückzuführen ist. Im Meer handelt es sich dabei hauptsächlich um ^{40}K-Zerfälle oder Biolumineszenz.
Bei den registrierten Ereignissen wird zwischen Kaskaden- und Spurereignissen unterschieden. Den Kaskadenereignissen sind sowohl hadronische als auch elektromagnetische Schauer zuzuordnen. Diese sind an einer Stelle des Detektors lokalisiert und breiten sich kugelförmig aus. Spurereignisse ziehen sich über eine längere Strecke durch den Detektor und werden durch Myonen ausgelöst, welche eine größere mittlere freie Weglänge besitzen. Da in dieser Arbeit die Kalibration des ORCA-Detektors mit atmosphärischen Myonen untersucht wird, wird im Folgenden die Rekonstruktion von Spurereignissen näher betrachtet.
Aus den detektierten Treffern kann auf Eigenschaften des zugrundeliegenden Teilchens wie die Richtung oder die Vertexkoordinaten zurückgeschlossen werden. Dies kann sowohl auf reale als auch auf simulierte Daten angewandt werden, wie in Abschnitt 3.2 näher erläutert wird. [7] [9]

3.2 Rekonstruktion von Spurereignissen

Mit den gemessenen Daten eine Spur eines Myons zu rekonstruieren, ist aufgrund der Streuung im Wasser ein kompliziertes nichtlineares Problem. Um das zu lösen, wird die Rekonstruktion in mehreren Schritten durchgeführt.
In einem ersten Schritt wird ein linearer Fit an die Daten erstellt. Es wird also auf Basis der registrierten Treffer eine Spur ermittelt, die am ehesten die Daten wiedergibt. Die Ergebnisse dieses Fits werden als Startparameter für einen Likelihood-Fit verwendet.
Für eine genauere Spurrekonstruktion werden (basierend auf dem linearen Fit) aus den Annahmen über die Teilcheninteraktion und die Struktur des Detektors sogenannte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (engl. „probability density functions“ , kurz: PDFs) definiert. Diese PDFs beinhalten für jede PMT Vorraussagen darüber, wann das Licht

eines Ereignisses die PMT erreichen sollte. In einem Vergleich mit den tatsächlichen Daten wird nach einer möglichst großen Übereinstimmung in Ort, Richtung und Energie gesucht. Als Ergebnis des Vergleichs beschreibt die Likelihood, wie gut eine Vorhersage zu den tatsächlichen Daten passt. Diese kann auch als Güteparameter zur Bewertung der Rekonstruktion verwendet werden.
Mithilfe dieses Verfahrens können ebenso in Monte Carlo erzeugte Teilchenspuren rekonstruiert werden. Durch einen Vergleich des Ergebnisses der Rekonstruktion mit der simulierten Spur kann damit die Qualität des Rekonstruktionsprogramms überprüft werden. [7]

3.3 Kalibrationsmethoden

Um bei der Rekonstruktion von Neutrinointeraktionen ein möglichst präzises Ergebnis zu erhalten, ist eine genaue Kenntnis über die Position und Neigung der DOMs im Wasser notwendig. Es werden verschiedene Schritte angewandt, um eine optimale Kalibration zu erreichen.
Zunächst wird jede DU an Land vermessen und die Laufzeiten der Signale werden bestimmt. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben wurde, ist in jedem DOM aber auch eine LED, ein Kompass und ein akustischer Sensor verbaut. Durch den Kompass kann die Orientierung des DOMs bestimmt werden. Die LED kann Lichtsignale aussenden, die von höher liegenden DOMs aufgenommen werden. Dabei kann allerdings nicht unterschieden werden, ob Abweichungen auf die Position der DOMs oder auf die Laufzeit der Signale zurückzuführen sind. Zur genaueren Bestimmung der Position sind um den Detektor herum drei Emitter akustischer Signale aufgebaut. Aus den jeweiligen Sende- und Empfangszeitpunkten kann die Position des DOMs trianguliert werden.
Eine weitere Möglichkeit der Kalibration liegt darin, die Rekonstruktion der aufgenommenen Daten durchzuführen und mit der ermittelten Likelihood nach der optimalen Geometrie zu suchen. Die größte Likelihood gibt dann den Wert wieder, der am besten mit den Messdaten übereinstimmt. Dadurch können beispielswiese Unterschiede zwischen den DUs in der $x-$, $y-$ oder $z-$Richtung, in der Dauer der Signalübertragung oder in der Länge ermittelt werden.
Die Bestimmung der Längenkorrektur einer DU ist in Abb. 6 gezeigt. Das Maximum des Fits gibt den optimalen Korrekturfaktor für die Streckung der DU an. Dabei wird für jeden Datenpunkt die Rekonstruktion wie in Abschnitt 3.2 beschrieben durchgeführt und danach die Likelihood ermittelt. Zur Auslese des Maximums wird ein Polynom-Fit an die Daten gelegt. In diesem Fall wurde die Likelihood auf die Anzahl der Treffer normiert, damit sie nicht durch Ereignisse mit vielen Treffern dominiert wird. Die Unsicherheit wird dabei aus der Abweichung zwischen den Kalibrationsergebnissen verschiedener Ereignisse auf der DU bestimmt.
Zusätzlich zur Kalibration einer ganzen DU können auch die Zeitangaben für Treffer auf einzelnen DOMs kalibriert werden. Dafür werden mithilfe eines zusätzlichen Programms

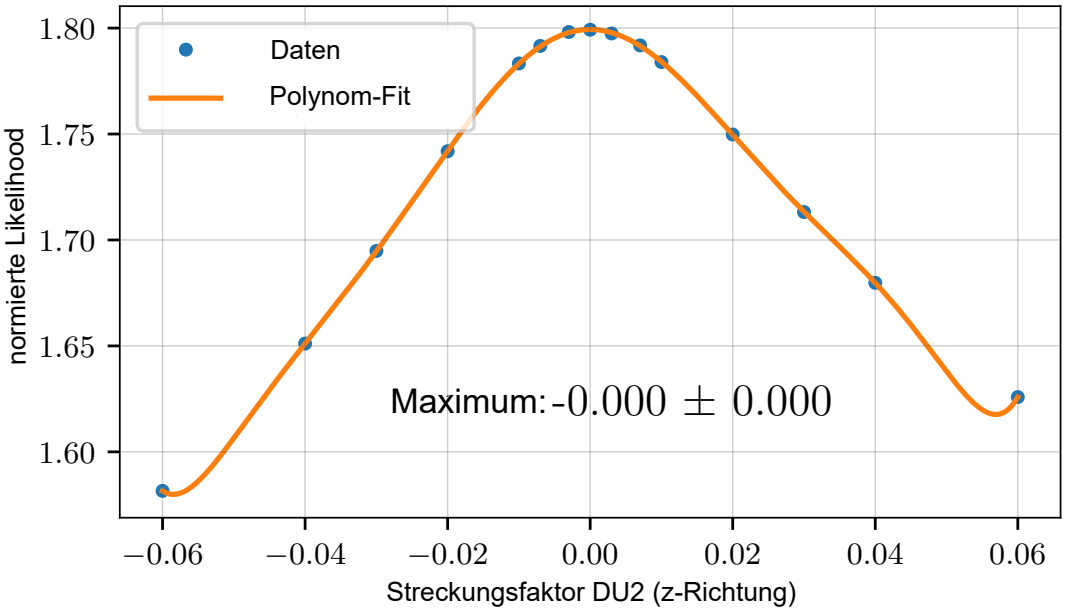

Abbildung 6: Polynom-Fit zur Bestimmung des optimalen Streckungsfaktors von DU2.

aus der Likelihood zeitliche Differenzen, sogenannte Zeitresiduen, zwischen den Daten und den rekonstruierten Teilchenspuren berechnet. In Monte Carlo Analysen können den DOMs verschiedene Offsets von wenigen Nanosekunden zugefügt werden, um zu testen, wie gut diese mit den Rekonstruktionsergebnissen übereinstimmen.
Mit der Analyse der Zeitresiduen ist es möglich, Verzögerungen in der Übertragung der Signale oder Verschiebungen der Positionen der DOMs festzustellen. Allerdings können beide Effekte nicht voneinander unterschieden werden.
Zur Bestimmung der Zeitresiduen wird die vorher rekonstruierte Spur genutzt und, wie in Gleichung (3) angegeben, die Differenz zwischen den Trefferzeitpunkten der gemessenen und der rekonstruierten Daten pro DOM ermittelt.

$$t_{\text{res}} = t_{\text{detektiert}} - t_{\text{rek}} \tag{3}$$

An die so ermittelten Zeitresiduen wird ein Gaußfit angelegt, wobei die Position des Maximums als Zeitresiduum des DOMs verwendet wird. Dies ist in Abb. 7 dargestellt. Abb. 8 zeigt die Entwicklung der Zeitresiduen für sechs DOMs auf DU4 über mehrere Iterationen. Dabei wird in jeder Iteration das Maximum des Fits aus Abb. 7 ermittelt. Im nächsten Iterationsschritt wird dann das jeweilige DOM im Detektor um den gefundenen Offset modifiziert und die Zeitresiduen werden erneut bestimmt. [7]

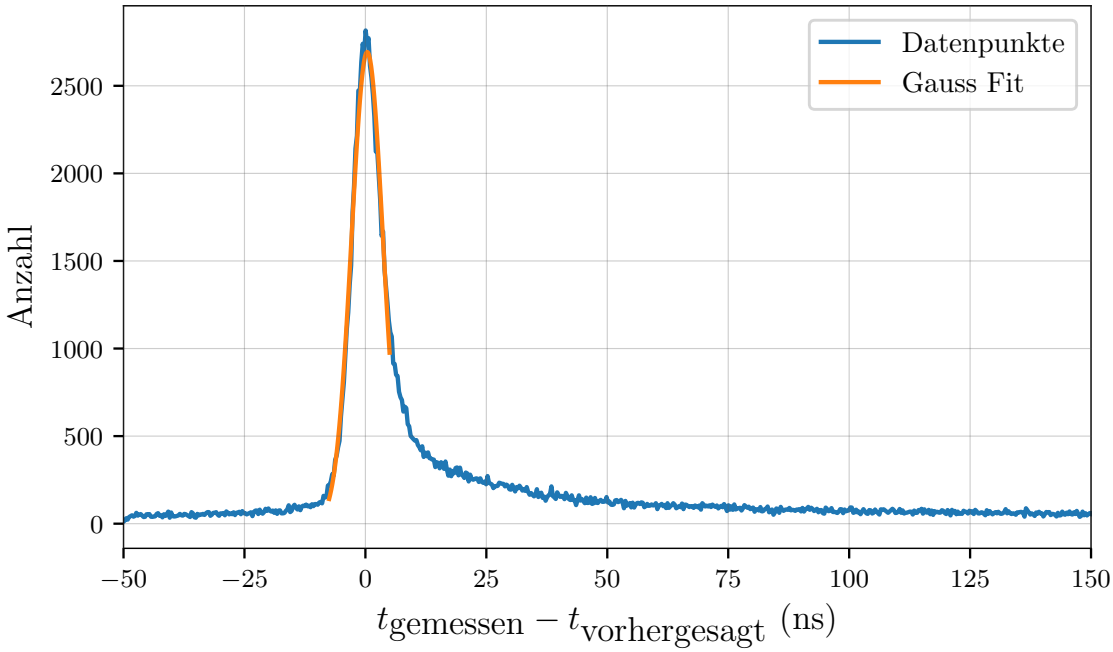

Abbildung 7: Zeitresiduen für ein DOM mit angefitteter Gaußfunktion.

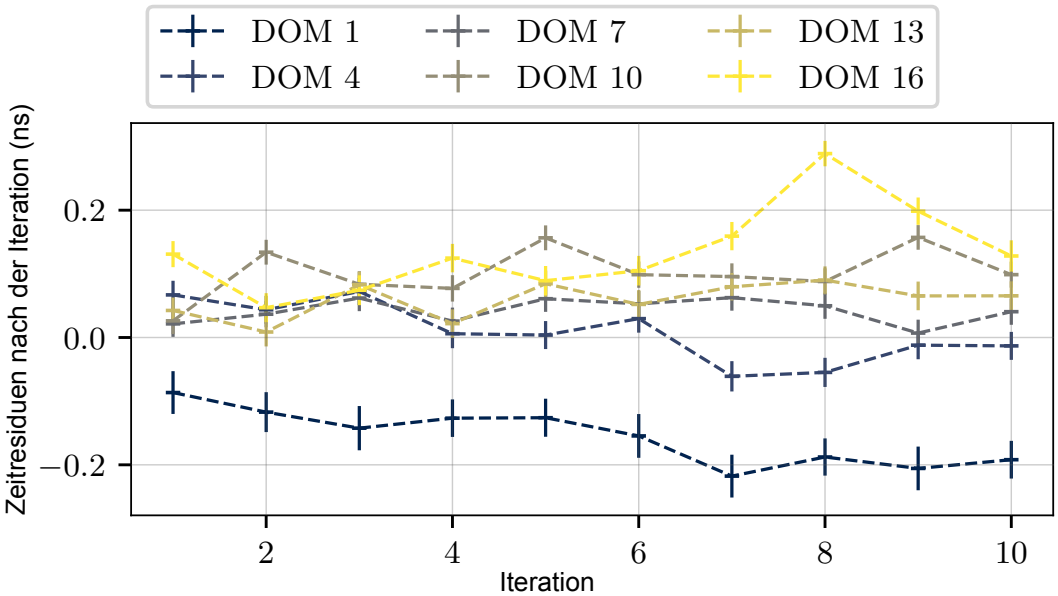

Abbildung 8: Entwicklung der Zeitresiduen für sechs DOMs auf DU4 über 10 Iterationen.

4 Studien zur Längenkalibration einzelner DUs

Die Analyse der Streckungskorrekturen ist der erste Teil dieser Arbeit, in dem der Einfluss auf die Rekonstruktion durch Reduzierung des Detektors auf eine DU diskutiert wird. Dabei werden verschiedene Simulationen mit gestreckten und gestauchten DUs durchgeführt und es wird getestet, inwiefern der wahre Streckungsfaktor richtig erkannt wird. Dabei wird auf die in Abschnitt 3.3 beschriebene Methode zur Längenkalibration zurückgegriffen.
Zunächst soll in diesem Kapitel der Grund für die Studien an einzelnen DUs dargelegt werden. Dann werden die Parameter für die Ereignisrekonstruktion mit einzelnen DUs in Monte Carlo Simulationen optimiert. Als letztes wird mit den erlangten Erkenntnissen eine Rekonstruktion echter Daten durchgeführt.

4.1 Motivation für Studien an einzelnen DUs

Für die Simulationen wird zunächst der ORCA-Detektor mit fünf DUs verwendet. Da die Datenübertragung der ersten installierten DU inzwischen nicht mehr funktioniert, können nur noch DU2 bis DU5 verwendet werden. Eine Darstellung der Anordnung der DUs zueinander ist in Abb. 9 gegeben.

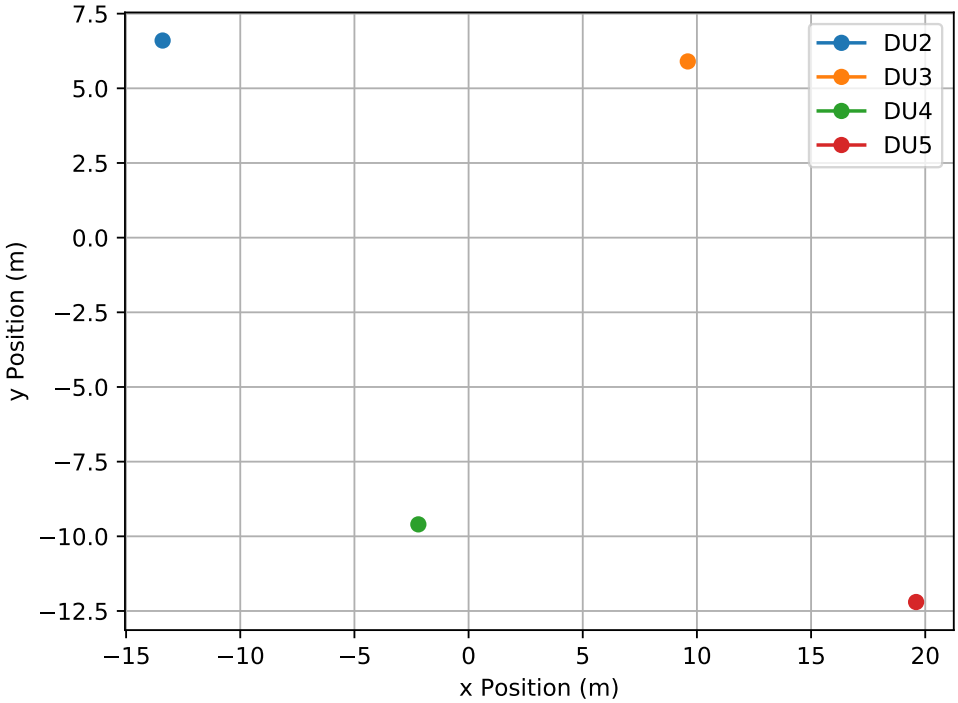

Abbildung 9: Positionen der funktionierenden vier DUs im Detektor.

Im Folgenden werden diese DUs in Monte Carlo Simulationen mit drei verschiedenen Streckungsfaktoren verändert. Im ersten Fall ist keine DU gestreckt, also ist der Detektor im Vergleich zur Erstellung der Daten unverändert. Im zweiten Fall wird eine DU, hier DU2, um einen bestimmten Faktor gestreckt. Im dritten Fall sind alle vier DUs um den vorgegebenen Faktor gestreckt. Dabei wird zunächst eine Rekonstruktion mit allen DUs durchgeführt.

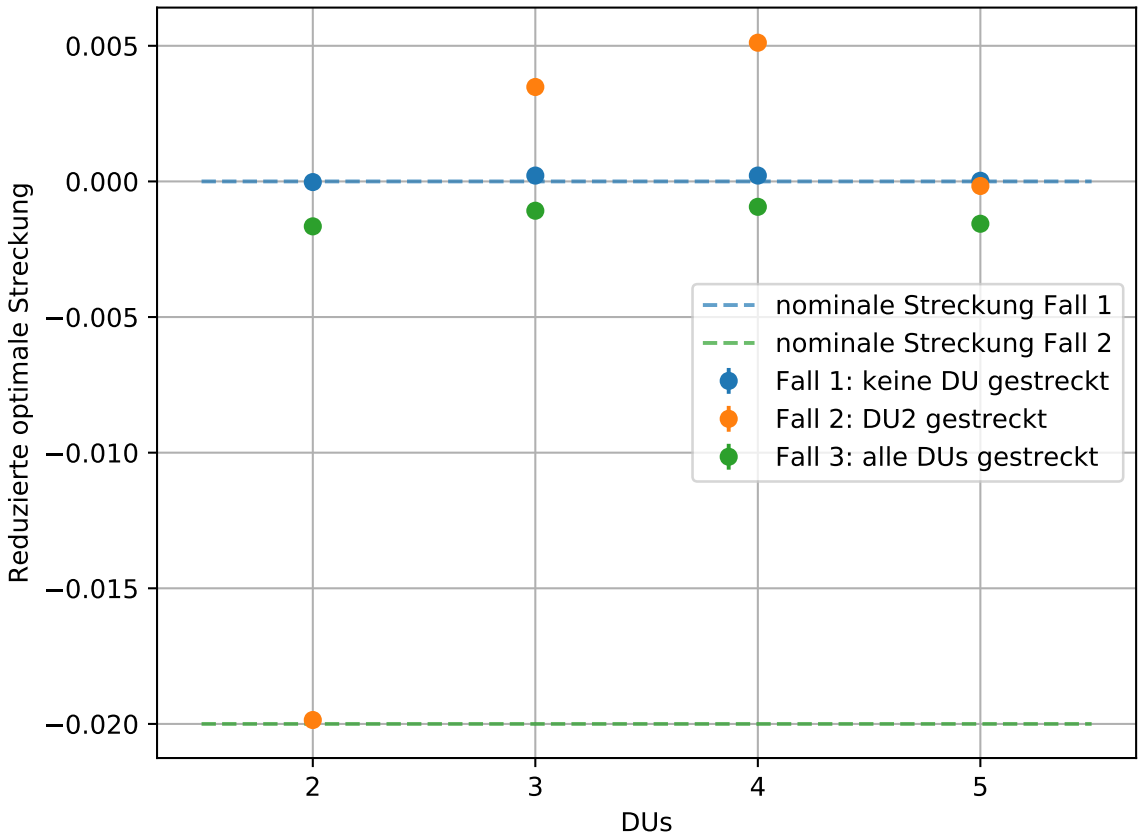

Abbildung 10: Normierte Streckungskorrekturen für einen ungestreckten Detektor, einen komplett gestreckten Detektor und einen Detektor mit gestreckter DU2 unter Verwendung aller DUs. Die Unsicherheiten sind jeweils kleiner als die Datenpunkte.

In Abb. 10 wurden die bei der Kalibration ermittelten Korrekturfaktoren für die Streckung der vier DUs aufgetragen. Im Fall 2 und 3 betrug der ursprüngliche Streckungsfaktor dabei 2 %. Die Unsicherheiten der Ergebnisse sind hier kleiner als die aufgetragenen Datenpunkte.
An den Ergebnisse des ungestreckten Detektors sieht man zunächst, dass die ermittelten Korrekturfaktoren den nominalen Wert von 0 % gut wiedergeben. Die Korrekturfaktoren der vier DUs liegen in einem Bereich von $(0{,}00 \pm 0{,}02)\,\%$, was einem ungestreckten Detektor entspricht. Kleine Abweichungen von dem erwarteten Wert sind durch die be-

grenzte Anzahl an rekonstruierten Ereignissen zu erklären.
Auch im Fall 2, bei dem eine DU gestreckt wird, wird das durch die Analyse der Streckungswerte gut rekonstruiert. Der Korrekturfaktor von $(-1{,}986 \pm 0{,}005)\,\%$ weicht kaum vom erwarteten Wert von gerundet $-2\,\%$ ab, welcher den simulierten Streckungsfaktor aufhebt. DU3 und DU4 werden in diesem Fall allerdings durch die benachbarte gestreckte DU2 beeinflusst, da sie ihr gegenüber gestaucht erscheinen, obwohl sie selbst unverändert sind. Dies führt zu leicht verfälschten Korrekturfaktoren von $(0{,}348 \pm 0{,}005)\,\%$ für DU3 und $(0{,}511 \pm 0{,}004)\,\%$ für DU4. DU5 befindet sich allerdings weiter entfernt (s. Abb. 9), sodass die Streckung auf sie kaum einen Einfluss ausübt.
Bis hierhin erfüllen die Ergebnisse also die Erwartungen. Für den Detektor, in dem alle DUs gestreckt sind, verhält sich das jedoch anders. Man würde hier erwarten, dass die Ergebnisse wie im zweiten Fall bei DU2 um $-2\,\%$ verteilt liegen. Offensichtlich können mit dieser Methode aber nur Unterschiede in der Streckung zwischen den DUs erkannt werden. Wenn alle DUs um den gleichen Faktor gestreckt werden, wird das im Ergebnis kaum erkannt.

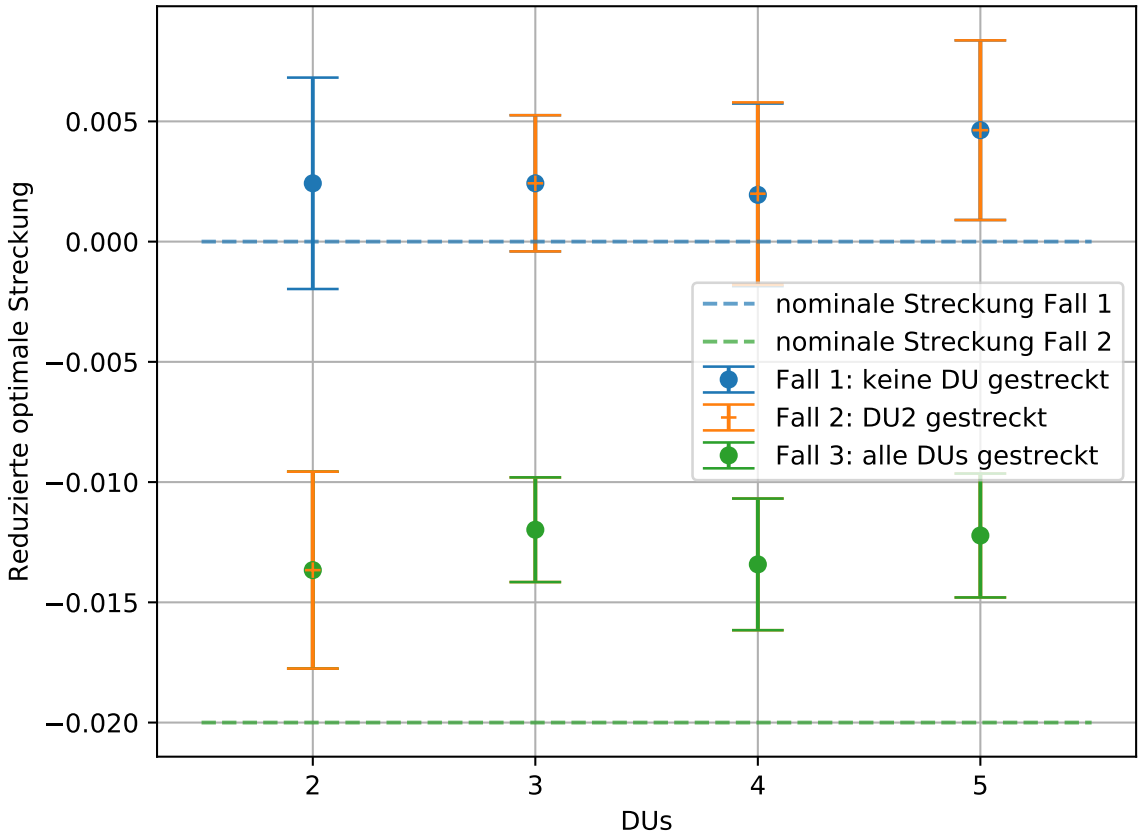

Abbildung 11: Normierte Streckungskorrekturen für einen ungestreckten Detektor, einen komplett gestreckten Detektor und für einen Detektor mit gestreckter DU2 mit Reduzierung auf einzelne DUs. Die Ergebnisse aus Fall 2 sind dabei identisch zu Ergebnissen aus Fall 1 bzw. 3.

Durch die Studien an einzelnen DUs soll nun untersucht werden, ob in diesem Fall die korrekten Streckungsfaktoren aller DUs wiedergegeben werden. In Abb. 11 sind die Korrekturfaktoren für die gleichen Fälle wie in Abb. 10 angegeben, allerdings wurden hier nur die Ereignisse auf den einzelnen DUs rekonstruiert. Was dabei zunächst auffällt, sind die deutlich größeren Unsicherheiten, was an der geringeren Zahl an rekonstruierten Ereignissen liegt. Weniger Datenpunkte führen dabei zu einer ungenaueren Rekonstruktion der Teilchenspur.
Bei der Analyse einzelner DUs stimmt im Fall 2 die Rekonstruktion der ungestreckten DUs mit der Rekonstruktion von DUs in einem komplett ungestreckten Detektor überein. Daher sind die Ergebnisse für DU3, DU4 und DU5 in den ersten beiden Fällen erwartungsgemäß identisch.
Außerdem existiert in der Rekonstruktion keine weitere DU, die als Vergleich verwendet werden kann. Deshalb wird durch diese Methode erkannt, wenn alle DUs gestreckt sind. Allerdings sind die Abweichungen der Ergebnisse von den erwarteten Korrekturfaktoren deutlich größer als bei der Standardmethode. Dies lässt sich besonders im Fall der gestreckten DUs erkennen, deren Ergebnisse in einem Bereich von $(-1,4 \pm 0,4)\,\%$ deutlich von $-2\,\%$ abweichen.
Um dieses Problem zu lösen, wird im Folgenden nach einer Möglichkeit gesucht, eine präzisere Kalibration der Streckung einzelner DUs zu erzielen. Dazu werden einige der Parameter variiert, die in die Bestimmung der Streckungskorrekturen eingehen. Bei diesen Parametern handelt es sich um den Polarwinkel der einfallenden Teilchen, die Anzahl an DOMs mit getriggerten Treffern auf einer DU und die Anzahl von getriggerten Treffern, die für ein Ereignis gefordert werden.
Die Analysen dazu wurden zunächst am Beispiel der einzelnen DU2 mit verschiedenen Streckungsfaktoren durchgeführt.

4.2 Abhängigkeit des Streckungsfaktors vom Polarwinkel

Die Entstehung atmosphärischer Myonen wurde in Abschnitt 2 erklärt. Abhängig von ihrem Polarwinkel legen diese nun einen unterschiedlich langen Weg zurück, bis sie auf die Detektoren bei KM3NeT treffen. Je größer der Polarwinkel der Myonen ist, desto länger ist ihr Weg durch die Atmosphäre und desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie auf dem Weg durch Wechselwirkungen gestoppt werden.

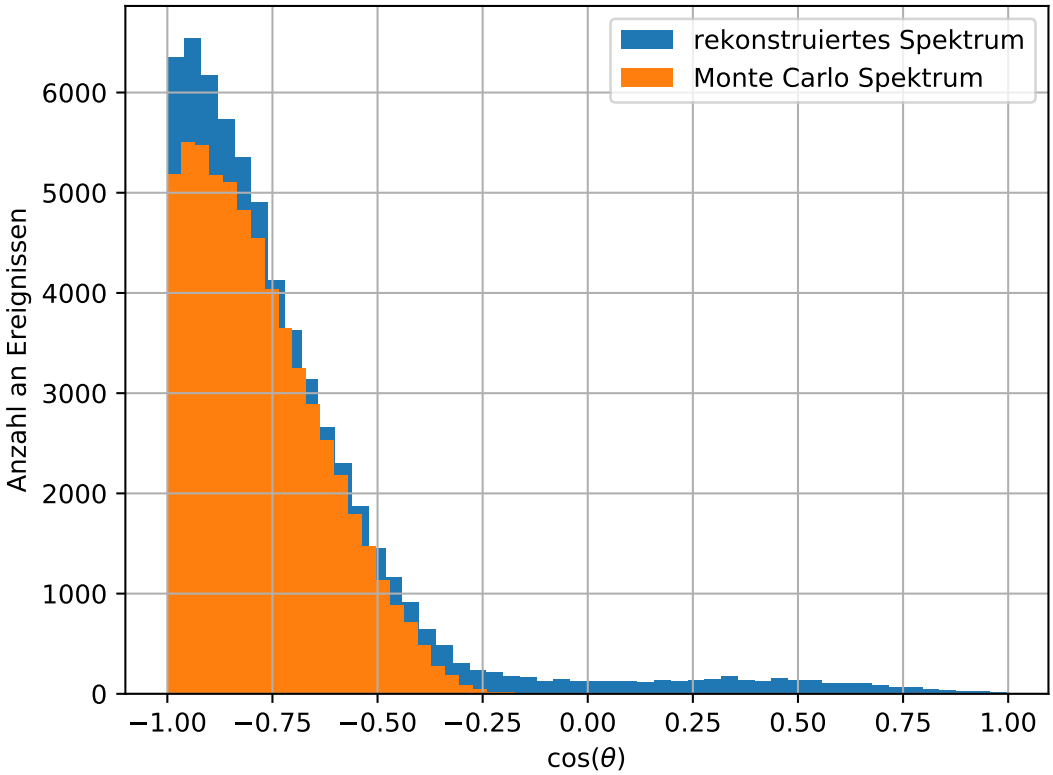

Abbildung 12: Anzahl simulierter und rekonstruierter Ereignisse als Funktion des Polarwinkels θ.

Die Anzahl von simulierten und rekonstruierten Ereignissen ist in Abb. 12 abhängig vom Polarwinkel gegeben. Bei den meisten Ereignissen nehmen die Myonen den kürzesten Weg durch die Atmosphäre; sie werden als abfallend bzw. „downgoing“ ($\cos\theta = -1$) bezeichnet. Wie man sieht, gibt es keine simulierten Ereignisse mit $\theta > -0,2$, da die Myonen die Erde nicht durchdringen können. Trotzdem werden einige Myonen als aufsteigend bzw. „upgoing“ rekonstruiert. Dabei handelt es sich um Fehlrekonstruktionen. Zunächst ist zu erwarten, dass Myonen unabhängig von ihrer Richtung ähnliche Korrekturfaktoren für die Streckung des Detektors ergeben. Abb. 13 zeigt allerdings eine Abhängigkeit von der Richtung der einfallenden Myonen.

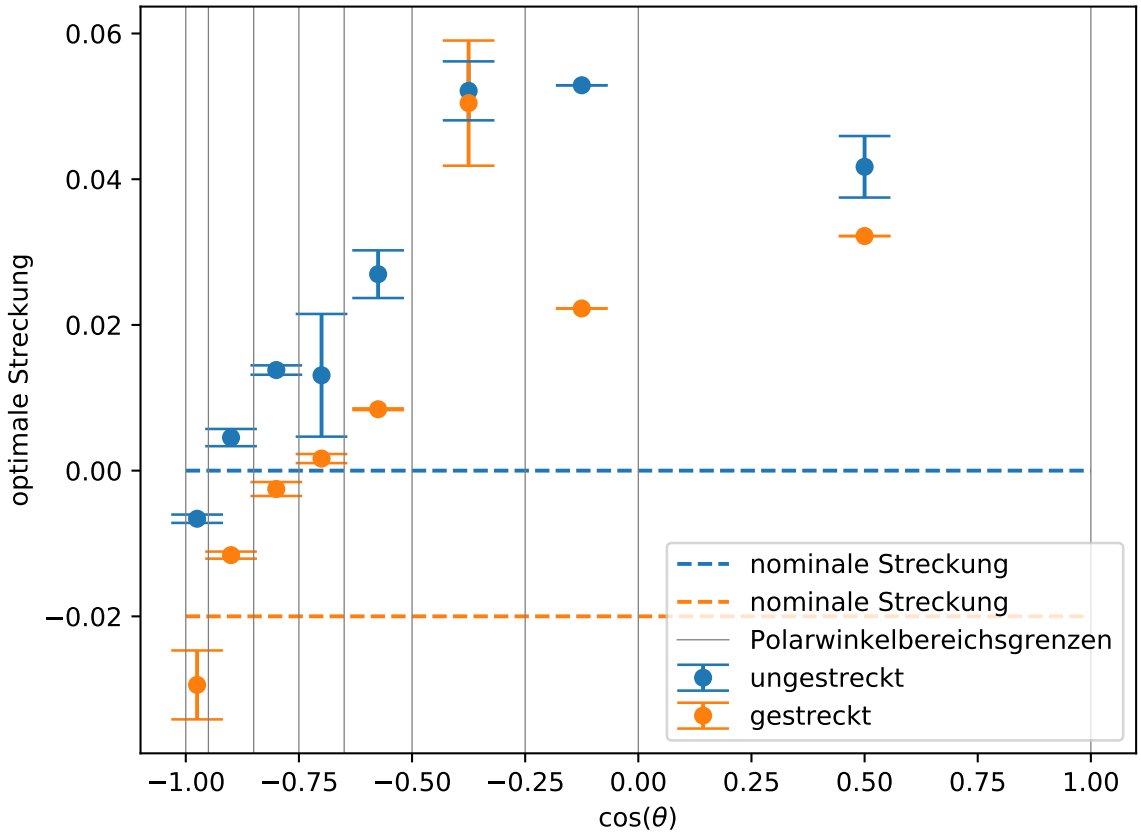

Abbildung 13: Normierte Streckungskorrekturen für die einzelne DU2 (gestreckt und ungestreckt) als Funktion des rekonstruierten Polarwinkels. In den beiden rechten Bereichen fehlt teilweise Statistik zur Angabe der Unsicherheit.

In dieser Abbildung wurden für verschiedene Polarwinkelbereiche die jeweiligen mittleren optimalen Korrekturwerte angegeben. Es lässt sich erkennen, dass die Abweichungen von der nominalen Streckung mit der Richtung der rekonstruierten Spuren deutlich ansteigt. Für diese Ergebnisse wurde die Likelihood auf die Anzahl an Treffern pro Ereignis normiert. Werden im Vergleich dazu die nicht reduzierten Ergebnisse betrachtet, ist zu erkennen, dass die Ergebnisse deutlich besser zur Eingabe passen. Daher werden im Folgenden für einzelne DUs nur noch die nicht reduzierten optimalen Streckungkorrekturen angegeben.
Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass kleine Ereignisse, welche durch die Normierung hervorgehoben werden, systematische Abweichungen einbringen. Ausgedehnte Spuren scheinen sich hier besser zur Bestimmung der Streckung zu eignen.

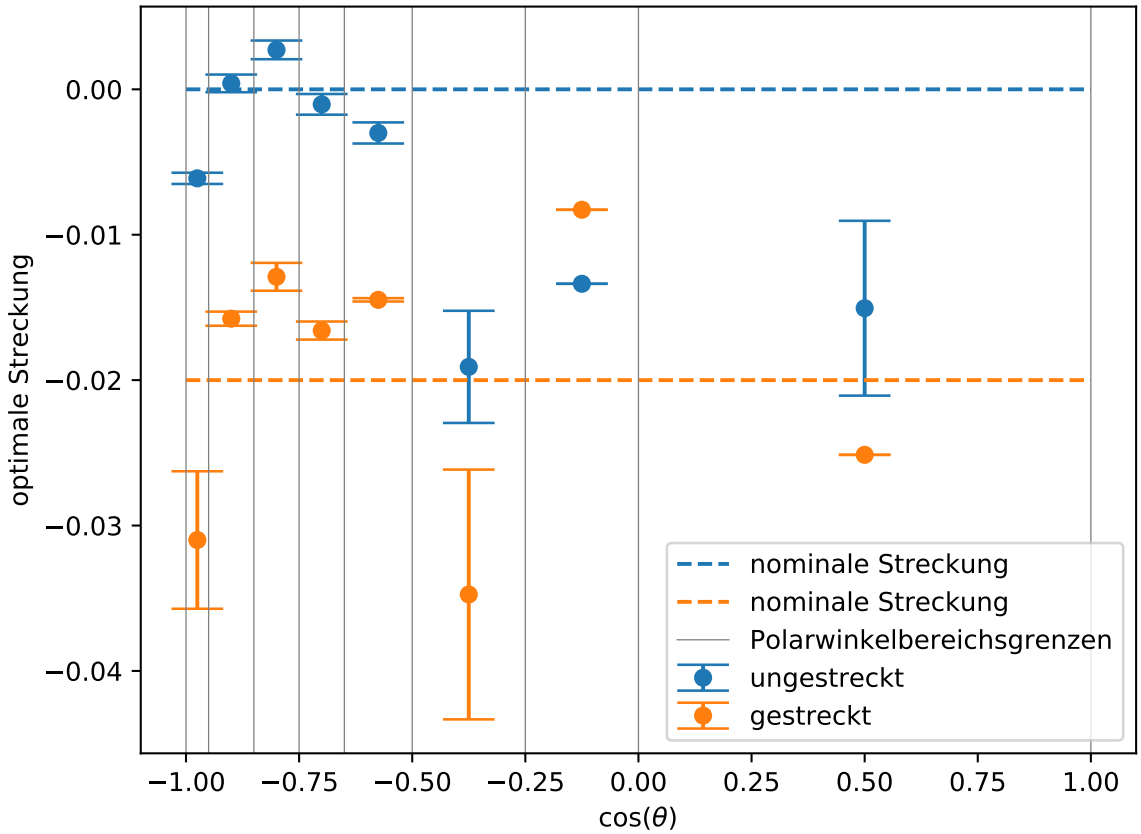

Abbildung 14: Streckungskorrekturen für die einzelne DU2 (gestreckt und ungestreckt) als Funktion des rekonstruierten Polarwinkels. In den beiden rechten Bereichen fehlt teilweise Statistik zur Angabe der Unsicherheit.

In Abb. 14 sind nun optimale Streckungsfaktoren dargestellt, die aus einer nicht normierten Likelihood ermittelt wurden. Im Gegensatz zu den reduzierten Werten sind diese enger um den jeweils erwarteten Wert herum verteilt. Allerdings lässt sich auch hier eine Abhängigkeit der Ergebnisse vom Winkel der einfallenden Spuren erkennen.
Dabei ist zu beachten, dass es sich nach Abb. 12 bei den Ergebnissen in den beiden rechten Bereichen um Fehlrekonstruktionen handelt und diese daher nur bedingt aussagekräftig sind. Aber auch die Ergebnisse, die nicht eindeutig falsch rekonstruiert wurden, weichen teilweise vom erwarteten Wert in einem Maß ab, das sich nicht nicht durch die jeweilige Unsicherheit erklären lässt. Besonders ausgeprägt ist die Abweichung dabei für $\cos\theta \approx -1$, also für Myonen, die fast fast senkrecht von oben auf den Detektor treffen. Dies steht im Gegensatz zu den Erwartungen, wonach die abfallenden Myonen vielversprechende Kandidaten für die richtige Bestimmung der Streckung wären.
Es soll nun ausgehend von Abb. 14 der Bereich von $\cos\theta$ für die Rekonstruktion ausgewählt werden, der die präzisesten Ergebnisse liefert.

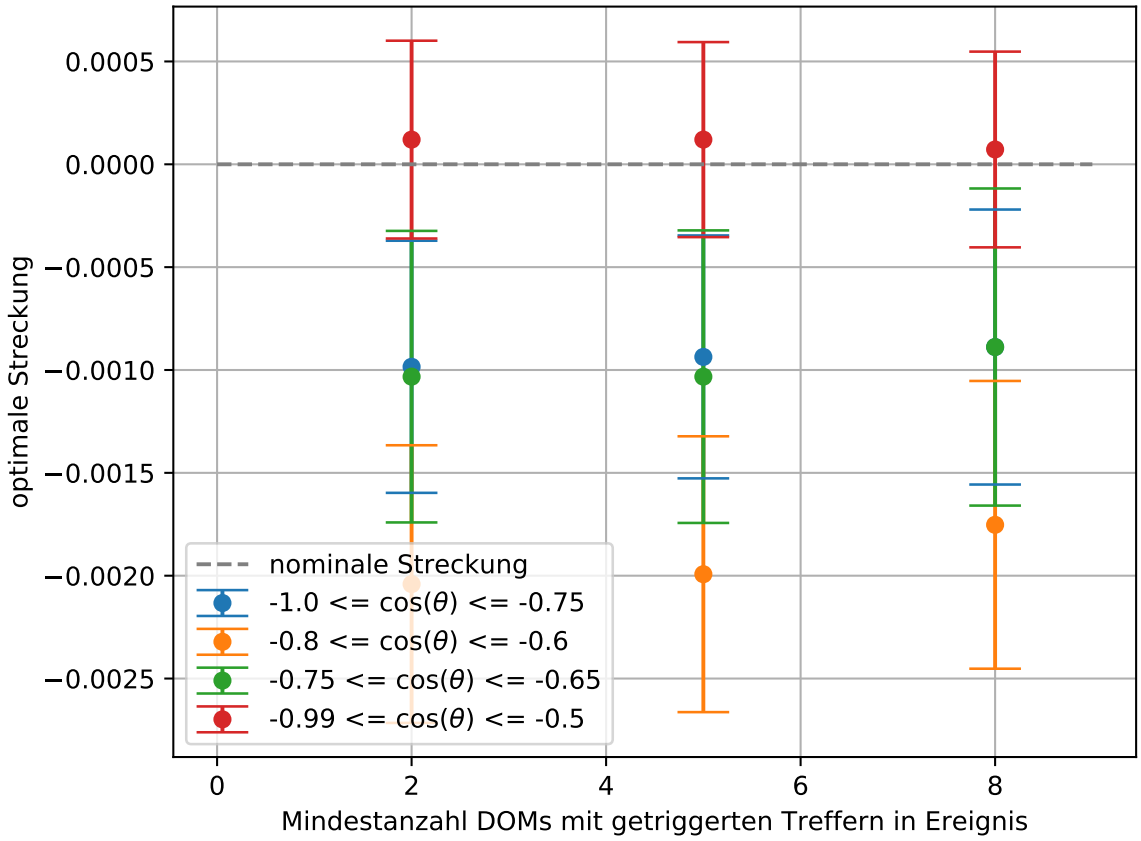

Abbildung 15: Streckungskorrekturen für die ungestreckte DU2 mit verschiedenen Polarwinkelbereichen.

Die Korrekturwerte für die einzelne, ungestreckte DU2 sind in Abb. 15 angegeben. Neben der Variation des Polarwinkels wurden hier außerdem die Abhängigkeit von einem weiteren Parameter aufgetragen: die Anzahl DOMs, auf denen Treffer registriert werden müssen, damit ein Ereignis für die Auswertung verwendet wird. Die Auswahl der vier abgebildeten Bereiche basiert auf der vorherigen Analyse der Winkelabhängigkeit mit verschiedenen Streckungsfaktoren auf verschiedenen DUs.
Auf den ersten Blick lässt sich an der Anzahl getroffener DOMs keine Abhängigkeit erkennen. Eine genauere Analyse dazu findet aber in Abschnitt 4.3.1 statt. Bei der Analyse der verschiedenen Polarwinkelbereiche ergeben sich deutlich größere Unterschiede. Dort gibt es nur einen Bereich, der den erwarteten Streckungsfaktor von 0.0 miteinschließt, und zwar $-0,99 < \cos\theta < -0,5$. Dieser Bereich beinhaltet also einen Großteil der abfallenden Myonen, schließt allerdings die Myonen aus, die senkrecht auf den Detektor treffen.
Abb. 16 zeigt die Ergebnisse für die gleichen vier Bereiche. Hier stimmt allerdings keiner der Korrekturwerte mit der nominalen Streckung überein. Dennoch ist die Abweichung zum erwarteten Wert kleiner als bei den Ergebnissen ohne Beschränkung des Polarwinkelbereiches in Abb. 11.

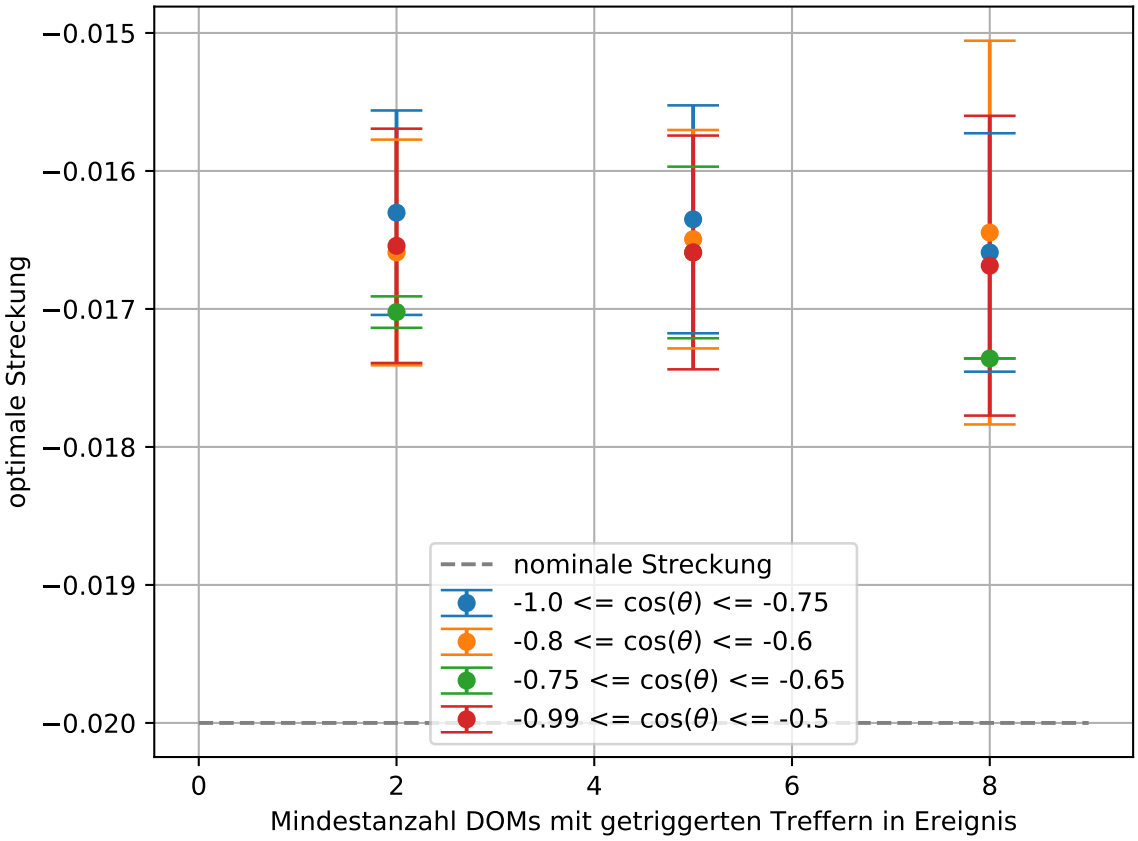

Abbildung 16: Streckungskorrekturen für die um 0,02 gestreckte DU2 mit verschiedenen Polarwinkelbereichen.

Der Grund für die weiterhin bestehende Abweichung ist die Abtastung an möglichen Streckungsfaktoren, die in der Bestimmung der optimalen Streckung verwendet wird. Standardmäßig liegen diese symmetrisch um 0 verteilt, mit einer größeren Dichte in der Mitte, womit eine Streckung von 2 % nur bedingt identifiziert werden kann. Passt man die Liste an Abtastwerten an den Bereich an, in dem sich der tatsächliche Streckungsfaktor der DU befindet, kann dieser genauer bestimmt werden. Diese Anpassung an unterschiedlich gestreckte DUs ist in Tabelle 1 verdeutlicht.

Streckung (%)	Abtastwerte (%)
0,0	-6; -4; -3; -2; -1; -0,7; -0,3; 0,0; 0,3; 0,7; 1; 2; 3; 4; 6
1,0	-7; -5; -4; -3; -2; -1,7; -1,3; -1,0; -0,7; -0,3; 0; 1; 2; 3; 5
2,0	-8; -6; -5; -4; -3; -2,7; -2,3; -2,0; -1,7; -1,3; -1; 0; 1; 2; 4

Tabelle 1: angepasste Abtastwerte zur Bestimmung der Likelihood bei vorgegebener Streckung

Für die Analyse der Werte in Abb. 17 wurden die oben genannten Anpassungen durchgeführt. Unter dieser Voraussetzung liegen die Ergebnisse deutlich näher an der nominalen Streckung. Auch hier kann mit dem Polarwinkelbereich von $-0,99 < \cos\theta < -0,5$ die getestete Streckung am präzisesten rekonstruiert werden. Mit diesem Bereich konnten auch auf anderen DUs und mit anderen Streckungsfaktoren wie zB. einer Streckung um 1 % die Rekonstruktionsergebnisse optimiert werden.
In der folgenden Untersuchung der Abhängigkeit der Ergebnisse von verschiedenen Filterparametern wird der Polarwinkel daher auf diesen Bereich zugeschnitten. Auch für die Analyse der realen Daten wird $-0,99 < \cos\theta < -0,5$ gewählt.

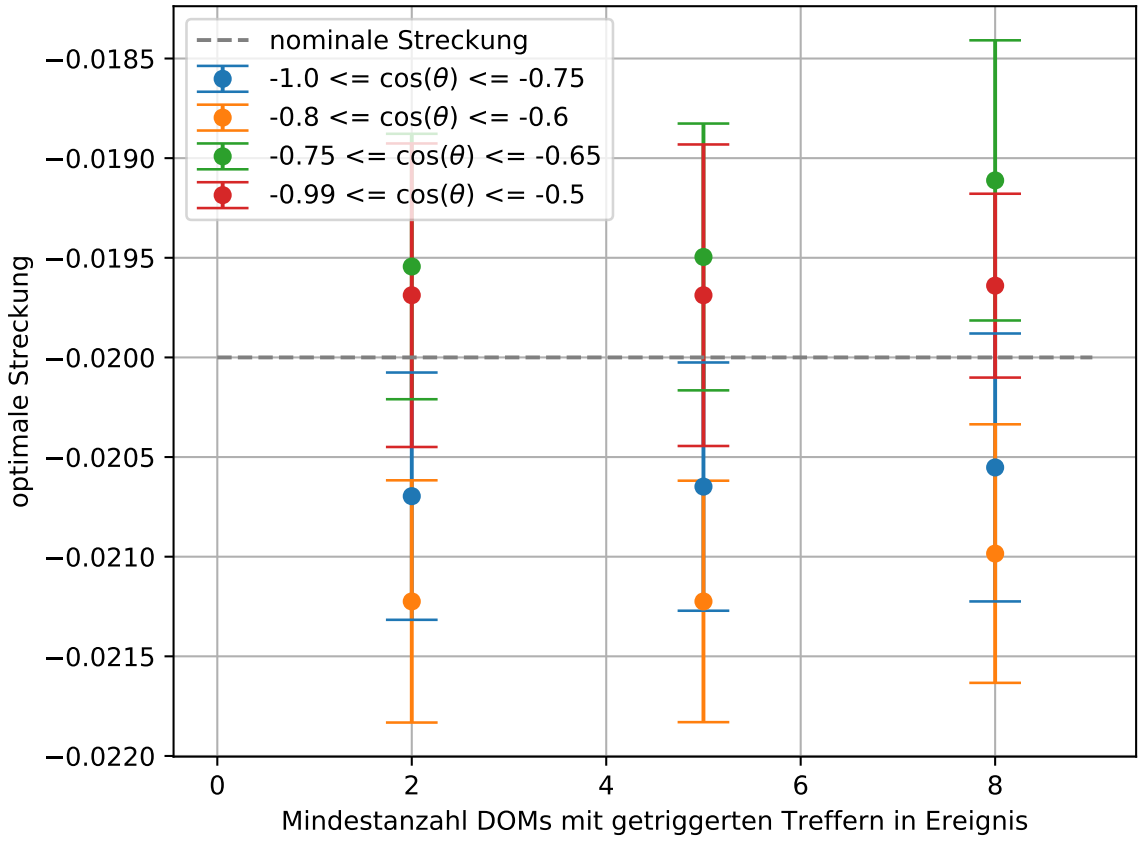

Abbildung 17: Streckungskorrekturen für die um 0,02 gestreckte DU2 mit verschiedenen Polarwinkelbereichen und an den Streckungsfaktor angepasster Ereignisrekonstruktion.

4.3 Filter zur Ereignisselektion

Um eine präzisere Kalibration zu erreichen, wird zunächst die Qualität der Daten verbessert, in dem die zugrundeliegenden Ereignisse selektiert werden. Das Filtern geschieht anhand mehrerer Parameter, von denen zwei im Folgenden näher analysiert werden. Dies sind eine geforderte Mindestanzahl an DOMs mit getriggerten Treffern und eine Mindestanzahl an getriggerten Treffern pro Ereignis. Der größte Unterschied zwischen diesen beiden Varianten besteht darin, dass die Selektion nach der Anzahl an getriggerten Treffern bereits vor der Rekonstruktion der Ereignisse stattfindet und somit potentiell Laufzeit einspart.

4.3.1 Anzahl an DOMs mit getriggerten Treffern

Ein möglicher Parameter zur Selektion der Ereignisse, der in Abschnitt 4.2 bereits kurz erwähnt wurde, ist die vorgegebene Mindestanzahl an DOMs, auf denen ein Ereignis getriggerte Treffer hinterlassen muss, damit es für die Auswertung berücksichtigt wird.

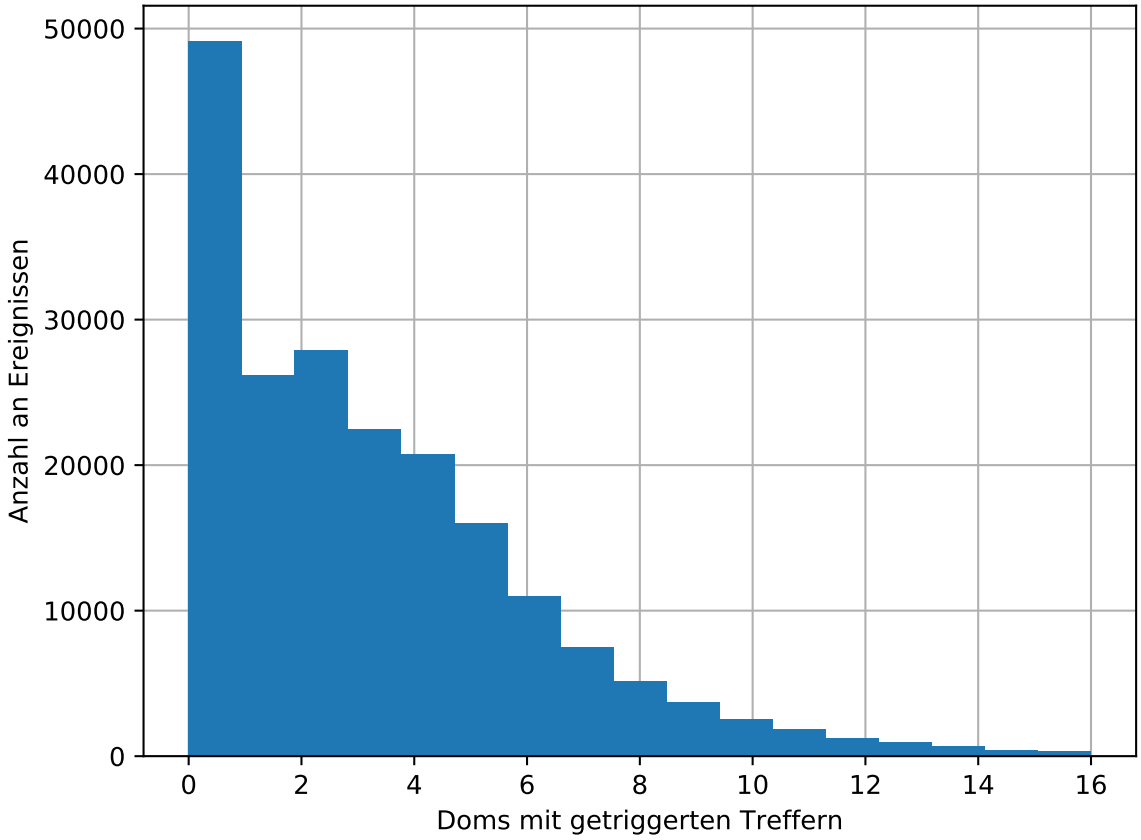

Abbildung 18: Anzahl an rekonstruierten Ereignissen aufgeteilt nach der Anzahl an DOMs mit getriggerten Treffern.

Die Anzahl an DOMs mit Treffern in einem Ereignis ist am Beispiel von DU2 in Abb. 18 dargestellt. Dabei wurden die rekonstruierten Ereignisse des gesamten Detektors betrachtet, was dazu führt, dass der größte Anteil an Ereignissen gar keinen Treffer auf einem DOM auf DU2 hat. Da nur größere vertikale Spuren mehrere DOMs auf einer DU treffen, sinkt die Zahl der Ereignisse deutlich mit der Zahl der DOMs.
Ein Verlauf der Korrekturfaktoren für verschiedene Zahlen getroffener DOMs ist in Abb. 19 gegeben. Für die Rekonstruktion wurde hier die ungestreckte DU2 mit dem in Abschnitt 4.2 ausgewählten Polarwinkelbereich verwendet.

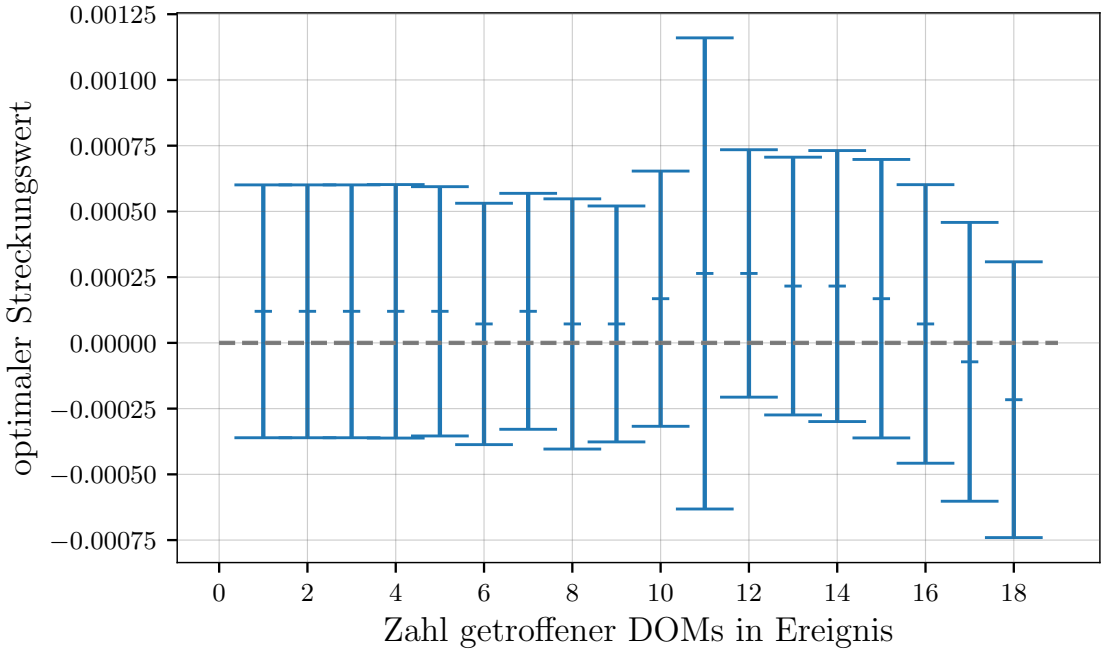

Abbildung 19: Streckungskorrekturen als Funktion der Anzahl getroffener DOMs für die ungestreckte DU2 mit ausgewähltem Polarwinkelbereich.

Bei den Streckungskorrekturen ist keine eindeutige Abhängigkeit zu erkennen. Für kleine Werte getroffener DOMs sind die Ergebnisse nahezu konstant und für größere Werte schwanken sie leicht, schließen aber dennoch den Wert der nominalen Streckung im Unsicherheitsintervall mit ein. Die präzisesten Ergebnisse erhält man demnach für eine geforderte Anzahl von 16 oder 17 DOMs. Dabei lässt sich die näherungsweise konstante Unsicherheit durch eine Steigerung der Qualität der Ereignisse bei gleichzeitig sinkender Statistik erklären. Der Mittelwert der dargestellten Verteilung liegt bei $(0{,}011 \pm 0{,}017)\,\%$.
Auch für andere Streckungsfaktoren und auf anderen DUs ergab sich eine ähnliche Verteilung der Ergebnisse. Da einer Forderung von 16 DOMs oder mehr allerdings zu einer deutlichen Verringerung der Statistik führen würde, sollte der untersuchte Parameter im niedrigen einstelligen Bereich gewählt werden und wurde in weiteren Analysen auf fünf gesetzt.

4.3.2 Anzahl getriggerter Treffer in einem Ereignis

Neben der Anzahl an DOMs, die Treffer eines Ereignisses registriert haben, können Ereignisse auch nach der Anzahl der getriggerten Treffer selbst selektiert werden. Dabei werden Ereignisse, die aus weniger Treffern bestehen als vorgegeben, für die Kalibration aussortiert.

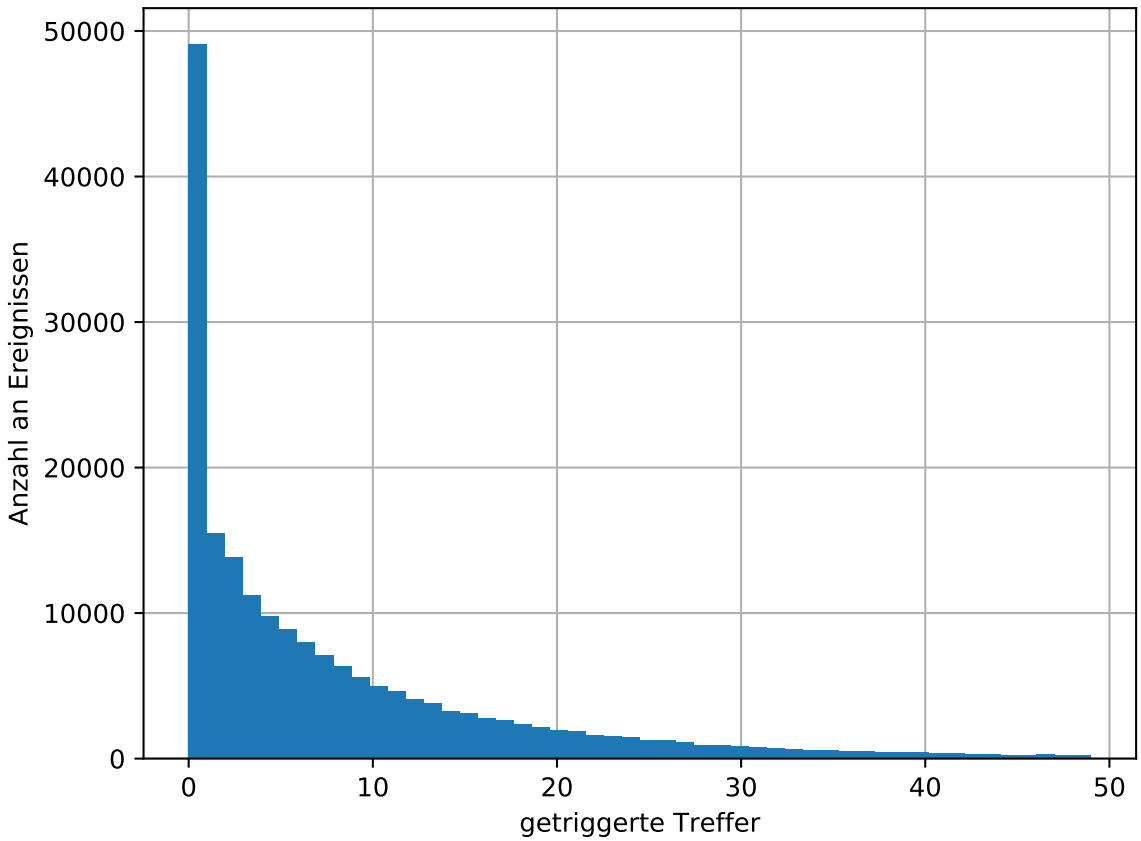

Abbildung 20: Ereignisse in Abhängigkeit der Anzahl getriggerter Treffer auf DU2.

Abb. 20 zeigt die Anzahl aller Ereignisse, die im Detektor registriert wurden, als Funktion der Anzahl an getriggerten Treffern auf DU2. Demnach haben viele Ereignisse keinen Beitrag auf DU2, sondern auf den anderen drei DUs. Analog zu Abb. 18 sinkt die Zahl der Ereignisse außerdem mit anwachsendem Selektionsparameter.
Die Auswirkungen dieser Vorauswahl auf die Ergebnisse der Kalibration sind in Abb. 21 für drei verschiedene Streckungsfaktoren der vier einzelnen DUs dargestellt.

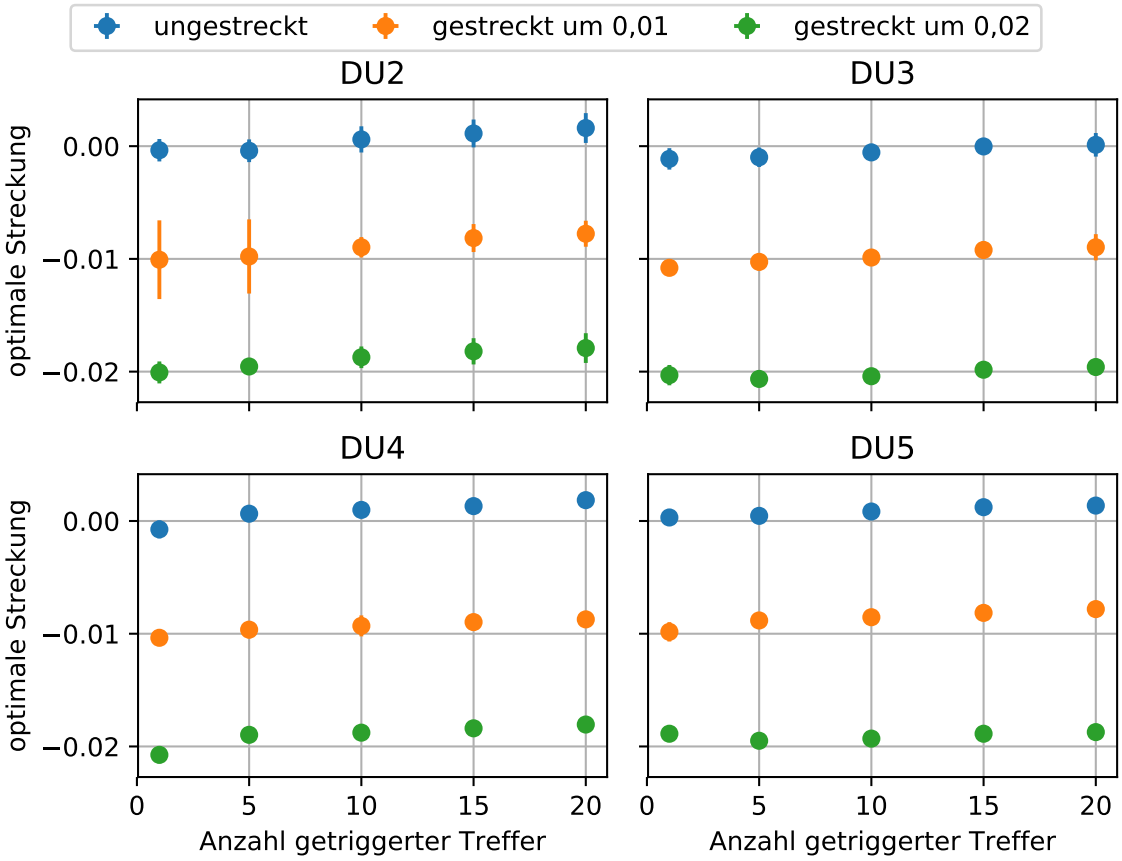

Abbildung 21: Streckungskorrekturen in Abhängigkeit der für die Kalibration vorgegebenen Anzahl an Treffern pro Ereignis für die vier einzelnen DUs mit drei verschiedenen Streckungsfaktoren.

Es ist zu erkennen, dass die optimalen Streckungswerte mit wachsendem Selektionsparameter für die einzelnen DUs im Mittel leicht ansteigen. Im Fall von DU2 ist diese Steigung stetig, doch für DU3 und DU5 ist im Fall einer Streckung um 2 % zunächst ein Abfallen zu Erkennen. Das führt dazu, dass bei DU3 sowohl kleine als auch große Werte von geforderten Treffern ein gutes Ergebnis für die Kalibration liefern, während bei allen anderen DUs nur niedrige Trigger den Wert der wahren Streckung in ihrem Unsicherheitsintervall mit einschließen.
Insgesamt werden die präzisesten Ergebnisse erzielt, wenn man die Ereignisse nicht nach Treffern selektiert. Für eine optimale Kalibration sind demnach auch weniger ausgedehnte Ereignisse mit wenigen Treffern von Relevanz. Für die folgende Analyse realer Daten wird daher kein Filter für eine Mindestanzahl an Treffern pro Ereignis angewandt.

4.4 Analyse realer Daten

Auf Grundlage der zuvor optimierten Parameter wird nun die Längenkalibration der einzelnen DUs mit realen Myonereignissen durchgeführt. Dabei werden zwei Datensets miteinander verglichen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden.
Der Unterschied zwischen den beiden Datensets besteht darin, dass in der Zwischenzeit das LOM von DU4 entfernt wurde. Dieses hatte sich bei der Installation der DU zunächst nicht gelöst und hat für zusätzlichen Auftrieb gesorgt, bis es später manuell gelöst wurde. Durch seine materiellen Eigenschaften besitzt das LOM eine Auftriebskraft von etwa 2750 N und pro 1000 N wirkt ein Streckungsfaktor von $0,1375\,\%$ auf eine DU. In der Gesamtlänge von 160 m ergibt sich damit ein Unterschied von 60,5 cm. Da es sich bei diesen Werten allerdings nur um ungefähre Schätzungen handelt, ist dieser Wert mit einer größeren Unsicherheit behaftet, die hier nicht bestimmt werden kann. [10]
Bei der Auswertung der Daten wird in drei Iterationen der Streckungsparameter der DUs ermittelt. Die erste Iteration wird mit ungestreckten DUs durchgeführt, in den folgenden Iterationen wurde die jeweilige DU um den optimalen Streckungswert der vorherigen Iteration angepasst.

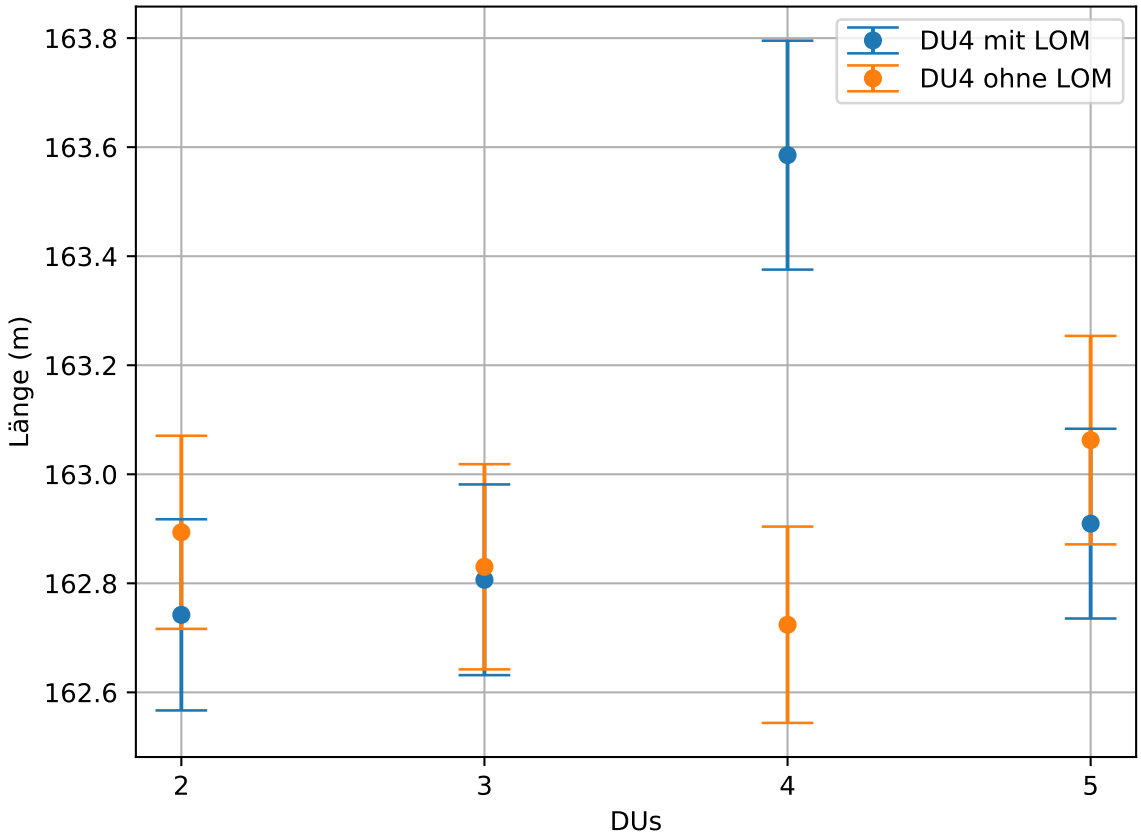

Abbildung 22: Längenkalibration einzelner DUs auf Basis realer Myonereignisse. Vor der Aufnahme des zweiten Datensets wurde das LOM von DU4 entfernt.

Abb. 22 zeigt die optimale Länge der DUs nach Ende der dritten Iteration. Die angewandten Streckungsfaktoren wurden dafür mit der ursprünglichen Länge zwischen oberstem und unterstem DOM von 160 m multipliziert. Zusätzlich zur Unsicherheit der letzten Iteration geht dabei eine systematische Unsicherheit von $0,1\,\%$ in die Ergebnisse ein, welche berücksichtigt, dass auch mit den optimierten Parametern das Ergebnis in Monte Carlo teilweise nicht genauer bestimmt werden kann.
Dabei lässt sich erkennen, dass die Ergebnisse von DU2, DU3 und DU5 im Rahmen ihrer Unsicherheiten übereinstimmen. Bei DU4 beträgt die Abweichung (86 ± 28) cm, was zu dem vorher abgeschätzten Wert von 60,5 cm passt. Mit den zuvor optimierten Parametern können somit sowohl der erwartete Unterschied bei DU4 als auch die Konsistenz der Ergebnisse für die restlichen DUs gezeigt werden.

5 Studien zur Zeitkalibration einzelner DUs

Die Analyse der Zeitresiduen stellt eine zusätzliche Möglichkeit zur Kalibration des Detektors dar. Analog zu Abschnitt 4 werden im Folgenden besonders die Auswirkung der Reduzierung des Detektors auf eine einzelne DU untersucht. Dafür werden verschiedene Offsets in der Signalübertragung der einzelnen DOMs simuliert. Mithilfe der auf den Zeitresiduen basierenden Kalibration und den künstlichen Zeitoffsets wird dann analysiert, inwiefern der hinzugefügte Offset erkannt werden kann.
In diesem Kapitel wird zunächst erneut der Grund für die Kalibration mit einzelnen DUs diskutiert. Danach werden die Auswirkungen dieser Methode näher analysiert und es wird überprüft, inwiefern eine Selektion der zugrundeliegenden Ereignisse die Ergebnisse der Kalibration verbessern kann.

5.1 Motivation für Studien an einzelnen DUs

Die Betrachtung einzelner DUs zur Rekonstruktion lässt sich durch einen Fall motivieren, in dem alle DOMs auf einer DU einem konstanten Offset von 2 ns unterliegen, wobei der Gesamtoffset der DUs unbekannt ist. Die Zeitresiduen eines solchen Detektors sind in Abb. 23 angegeben. Als Vergleich dazu wurden außerdem die Zeitresiduen des Detektors ohne Offset aufgetragen. Fehlende Punkte entsprechen dabei defekten DOMs.
Der Vergleich der beiden Kurven zeigt, dass der konstante Offset in der Signalübertragung am Verlauf der Kurve nahezu nichts ändert. Er führt allerdings zu einer ebenfalls konstanten Verschiebung der Ergebnisse um $(1{,}4 \pm 0{,}4)$ ns auf DU2 und $(-0{,}4 \pm 0{,}1)$ ns auf den übrigen DUs. Zusammenaddiert entspricht das dem simulierten Offset und spiegelt wieder, dass DU2 scheinbar zu früh reagiert, während die anderen DUs später reagieren.
Eine solche Verschiebung sollte für einzelne DUs nicht auftreten. Durch die Reduzierung auf eine DU haben Zeitoffsets zwischen den DUs keine Auswirkungen auf die Kalibration der Zeitresiduen. Daher besteht die Möglichkeit, mit dieser Methode Zeitoffsets zwischen den DOMs einer DU ohne Überlagerung durch Offsets zwischen den gesamten DUs zu untersuchen.
Allerdings ergibt sich aus einer Kalibration mit einzelnen DUs und dem gleichen Offset auf DU2, dass die Zeitresiduen eine Abhängigkeit von der Position der DOMs aufweisen. Die Abweichung der rekonstruierten von den gemessenen Treffern ist am ausgeprägtesten bei den niedrigsten und höchsten DOMs einer DU. Dies soll im Folgenden näher analysiert werden.

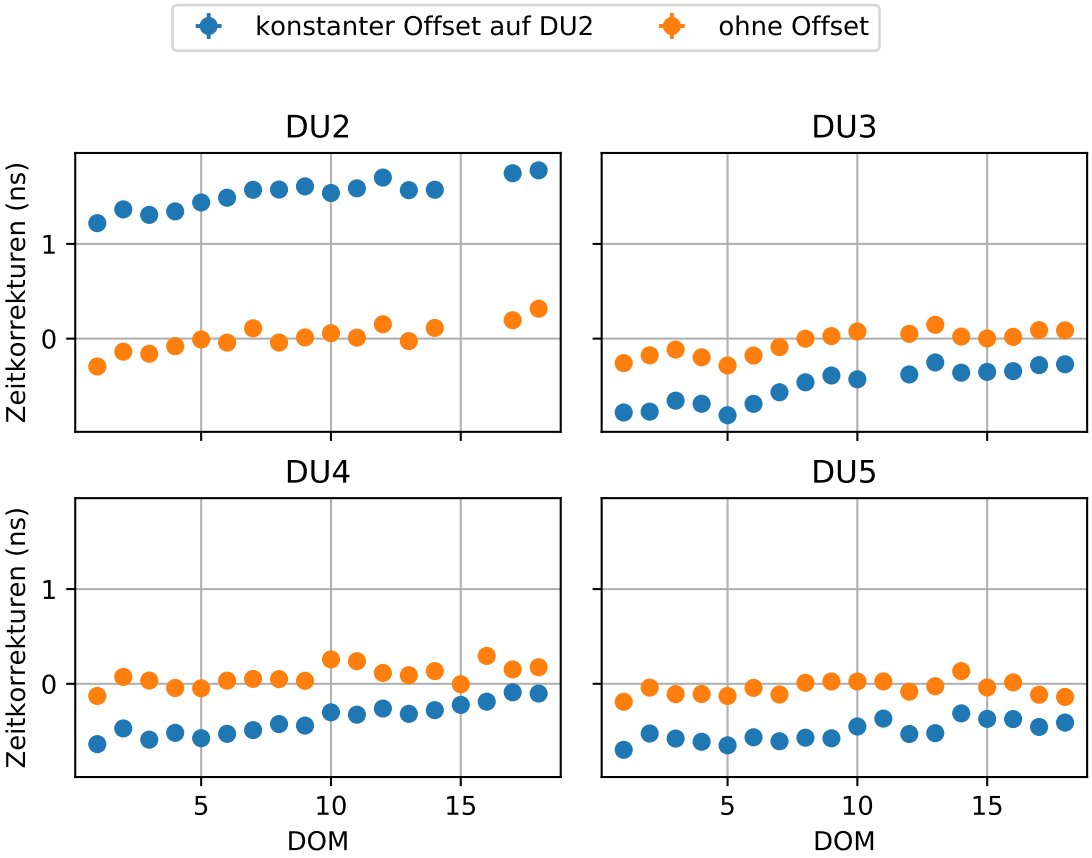

Abbildung 23: Zeitresiduen des vollständigen Detektors einmal ohne Offset und einmal mit konstantem Offset von 2 ns auf DU2.

5.2 Berechnung der Zeitresiduen einzelner DUs

Zunächst wird die Zeitkalibration mit einzelnen DUs ohne künstlich hinzugefügten Offset analysiert, um eine Ursache für die Abhängigkeit der Zeitresiduen von der Position der DOMs zu finden. Dazu wurden die Residuen für eine DU über 30 Iterationen ermittelt. Der Verlauf über die Iterationen ist in Abb. 24 angegeben.
Bei Betrachtung der Graphik zeigt sich, dass die Zeitresiduen der verschiedenen DOMs nahezu stetig anwachsen bzw. abfallen und sich damit immer weiter von 0 ns, dem wahren Wert, entfernen. Je höher das DOM sich dabei befindet, desto später treten tendentiell die rekonstruierten Treffer auf. Demnach wird die Kalibration an dieser Stelle durch systematische Effekte dominiert und liefert keine verwertbaren Ergebnisse. Die gleichen Effekte treten bei einzelnen DUs mit simulierten Offsets auf.

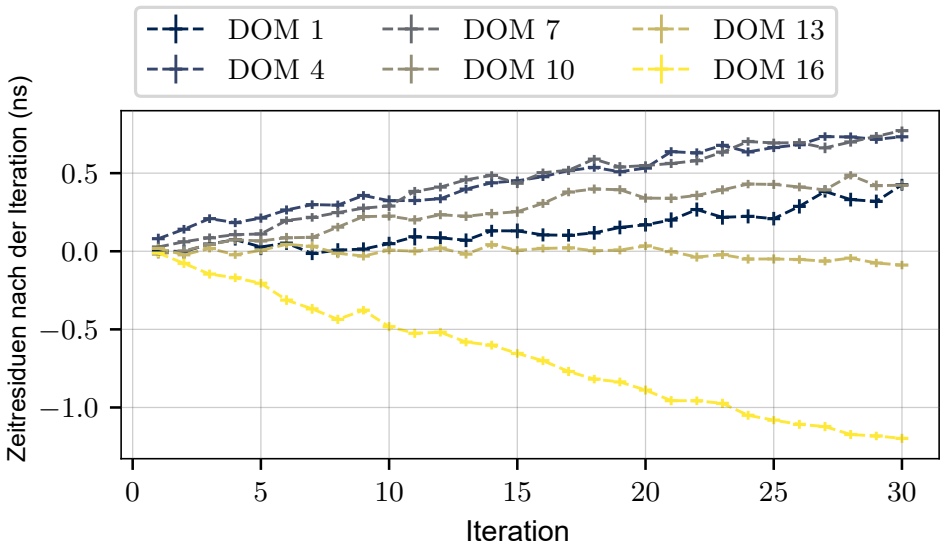

Abbildung 24: Entwicklung der Zeitresiduen über 30 Iterationen auf der einzelnen DU3 ohne simulierten Offset.

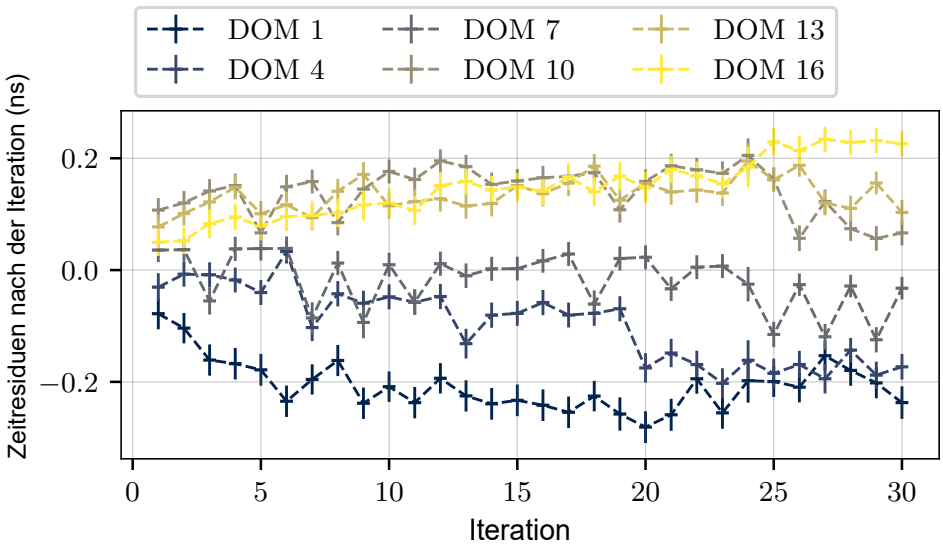

Abbildung 25: Entwicklung der Zeitresiduen über 30 Iterationen auf DU3 als Teil des gesamten Detektors ohne simulierten Offset.

Im Vergleich dazu sind in Abb. 25 die Verläufe der Zeitresiduen auf der gleichen DU als Teil des gesamten Detektors abgebildet. Im Gegensatz zu Abb. 24 lässt sich dort eine Konvergenz der Zeitresiduen erkennen, welche nur in einem kleinen Bereich um 0 ns schwanken. Die Divergenz der Zeitresiduen tritt demnach nur für einzelne DUs auf.
Ein möglicher Grund für die Divergenz der Zeitresiduen einzelner DUs ist, dass die Fitfunktion zu deren Bestimmung sich für einzelne DUs anders verhält. Für den gesamten Detektor wird dafür ein Fit einer Gaußfunktion verwendet. Mögliche andere Fitfunktionen wären eine Landauverteilung, eine Breit-Wigner-Funktion oder eine EMG-Verteilung („Exponentially Modified Gaussian“). Außerdem könnte der zu fittende Bereich angepasst werden.
Das konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht genauer analysiert werden. Stattdessen wird im Folgenden der Einfluss einer Selektion der Ereignisse untersucht, um damit gegebenenfalls sinnvollere Ergebnisse zu erhalten.

5.3 Ereignisselektion nach der Anzahl an getriggerten Treffern

Die Auswirkungen einer Selektion der Ereignisse nach der Anzahl an getriggerten Treffern auf die Streckungskalibration einer DU wurde bereits in Abschnitt 4.3.2 erwähnt. Nun soll der gleiche Filter für die Bestimmung der Zeitresiduen verwendet werden.

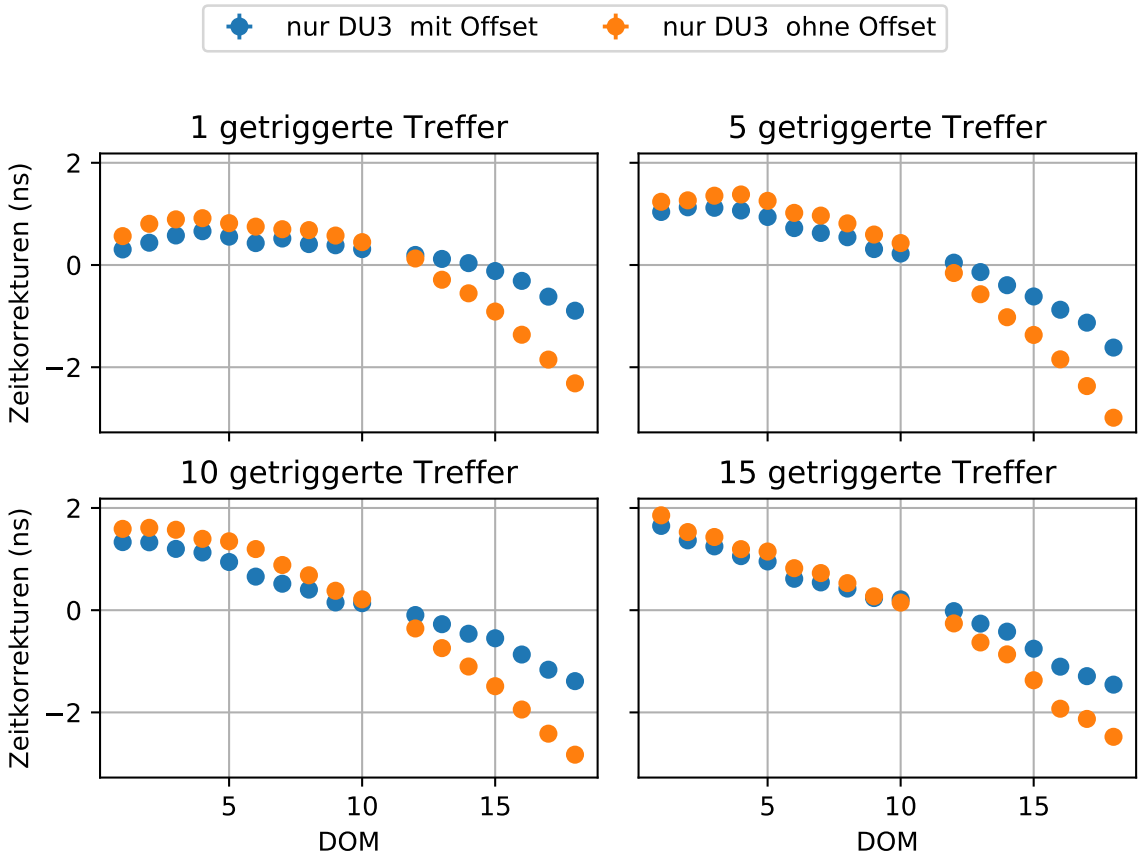

Abbildung 26: Finale Zeitresiduen der einzelnen DU3 mit und ohne simulierten Offset für unterschiedliche Vorgaben an getriggerten Treffern.

Die Zeitresiduen nach 30 Iterationen für DU3 sind in Abb. 26 in Abhängigkeit der Mindestanzahl von getriggerten Treffern pro Ereignis angegeben. Dabei zeigt sich, dass die Abhängigkeit der Residuen von der DOM-Position bei selektierten Ereignissen sogar noch ausgeprägter auftritt. Analog zu Abb. 24 sind diese ebenfalls für höhere DOMs zu negativen Werten verschoben.
Diese Verläufe deuten erneut auf systematische Effekte in der Berechnung der Zeitresiduen hin, die durch ein Filtern nach der Anzahl an getriggerten Treffern pro Ereignis nicht behoben werden können.

5.4 Möglichkeiten zur Bestimmung des Inter-DOM-Zeitoffsets

Wie zuvor diskutiert wurde, bietet die Zeitkalibration mit einzelnen DUs theoretisch die Möglichkeit, Zeitoffsets zwischen den DOMs einer DU statt Offsets zwischen verschiedenen DUs zu betrachten. Allerdings wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass bei der Berechnung der Zeitresiduen einzelner DUs systematische Effekte dominieren und die Methode daher ohne Anpassung nicht geeignet ist.
Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Zeitresiduen aller DUs um 0 ns zu zentrieren. Das lässt sich dadurch rechtfertigen, dass in Abb. 23 der Verlauf der Zeitresiduen mit konstantem Offset nahezu konstant verschoben ist zum Verlauf ohne Offset. So können konstante Offsets zwischen den DUs korrigiert werden, um nur die Zeitoffsets zwischen den DOMs einer DU zu untersuchen.

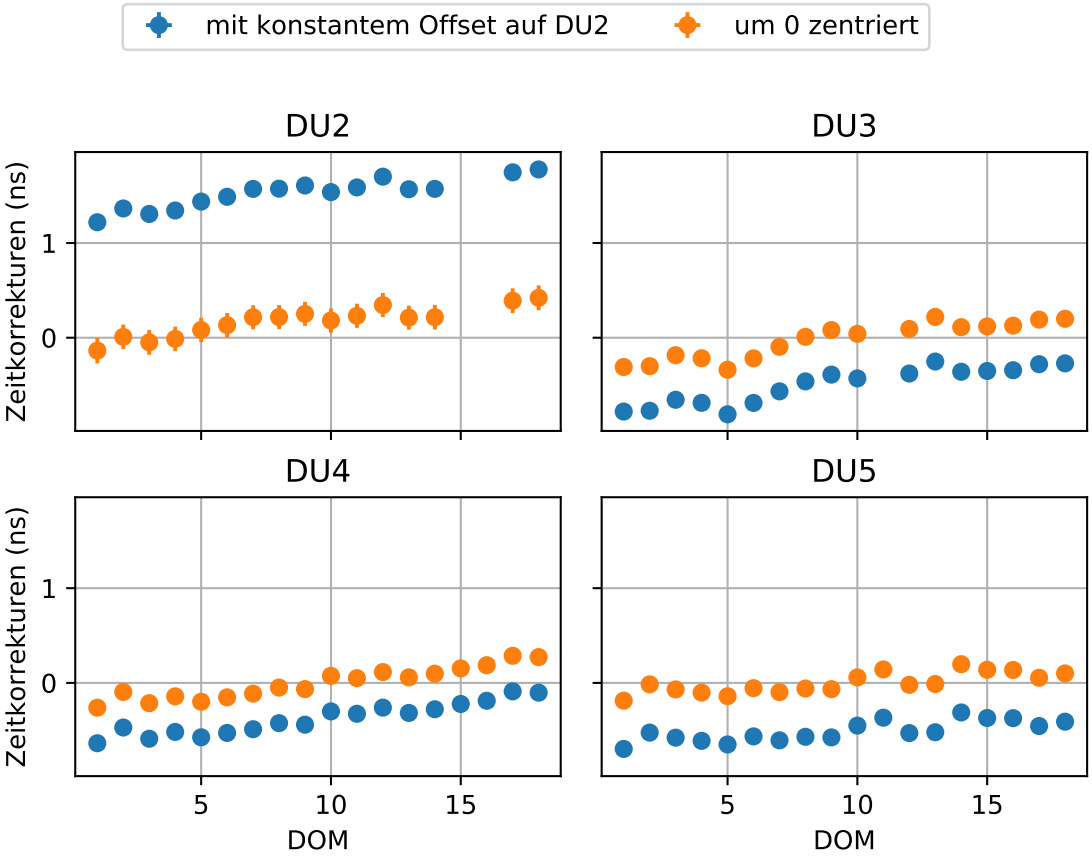

Abbildung 27: Zeitresiduen des gesamten Detektors mit einem konstantem Offset von 2 ns auf DU2 und um 0 ns zentriert.

Abb. 27 zeigt den ursprünglich rekonstruierten Verlauf und einmal die gleichen Ergebnisse um 0 ns zentriert. Dabei kommt die Unsicherheit der zentrierten Werte durch die Berechnung des durchschnittlichen Abweichung von 0 ns zustande. Aus den so entstandenen Zeitresiduen wurde damit der Einfluss des Offsets zwischen den DUs herausgefiltert.

Durch das Zentrieren kann außerdem der ursprüngliche Offset zwischen den DUs ermittelt werden, indem der Zeitoffset von DU2 zu einer anderen DU berechnet wird. In diesem Fall schließt der ermittelte Offset von $(1{,}81 \pm 0{,}13)$ ns den nominalen Offset von 2 ns allerdings nicht im 1σ-Intervall mit ein.
Diese Methode wurde bisher nur für eine DU mit konstantem Offset getestet. In einem weniger trivialen Fall von verschiedenen Offsets zwischen den DUs können diese nicht auf so einfache Weise bestimmt werden. Dann ist es empfehlenswert, die Offsets zwischen den DUs zunächst mithilfe anderer Methoden zu bestimmen und danach die Zeitresiduen der DOMs zu berechnen. Eine mögliche Methode ist dabei, analog zur Bestimmung der optimalen Streckung in Abschnitt 4, für verschiedene Zeitoffsets eine Likelihood zu ermitteln und diese zu maximieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Studien zur Optimierung der Kalibration des ORCA-Detektors durchgeführt. Dabei wurde vor allem die Kalibration unter Berücksichtigung einzelner DUs anhand zweier spezieller Methoden näher untersucht. Die zur Rekonstruktion der Teilchenspuren und damit auch zur Kalibration verwendeten Daten basieren auf atmosphärschen Myonen.
Der erste Teil dieser Arbeit behandelt die Längenkalibration einer DU. Dafür wurde zunächst die Kalibration mit einzelnen DUs dadurch motiviert, dass mithilfe dieser Reduzierung die absolute Streckung einer DU und nicht nur der Längenunterschied zu benachbarten DUs rekonstruiert werden kann. In Monte Carlo Studien wurden außerdem verschiedene Parameter optimiert, welche zur Kalibration verwendet werden.
Für den in der Kalibration ermittelten optimalen Streckungsfaktor konnte dabei eine Abhängigkeit von dem Polarwinkel des zugrunde liegenden Teilchens festgestellt werden. Dabei zeigte sich vor allem eine Abweichung des Ergebnisses von der nominalen Streckung für abfallende Myonen nahe $\cos\theta = 1$. Für die folgenden Analysen wurden daher nur Ereignisse mit $-0,99 < \cos\theta < -0,5$ verwendet. Eine weitere Analyse zur Selektion der Ereignisse vor der Spurrekonstruktion nach der Anzahl an DOMs mit getriggerten Treffern ergaben sich nahezu konstante Ergebnisse für eine steigende Anzahl an DOMs. Da eine Forderung nach einer großen Anzahl DOMs mit getriggerten Treffern die Statstik deutlich senkt, ist es sinnvoll, diese Zahl im niedrigen einstelligen Bereich zu wählen. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass eine Selektion nach der Anzahl an getriggerten Treffern ungenauere Ergebnisse liefert.
Mithilfe der so optimierten Parameter wurde schließlich die Kalibration an echten Daten durchgeführt. Durch das Lösen des LOMs auf DU4 ergab sich damit ein Längenunterschied von $(86 \pm 28)\,\mathrm{cm}$, welcher im Rahmen der Unsicherheit mit der Berechnung des Auftriebs durch mechanische Komponenten übereinstimmt.
Die zweite Kalibrationsmethode, die in dieser Arbeit untersucht wurde, ist die Analyse der Zeitresiduen der rekonstruierten Teilchenspur. Dabei ermöglicht die Verwendung einzelner DUs die Bestimmung der Zeitoffsets zwischen den DOMs einer DU. Allerdings zeigte sich, dass die Bestimmung der Zeitresiduen im Fall von einzelnen DUs durch systematische Effekte dominiert wird. Ein vorheriges Filtern der Ereignisse nach der Anzahl an getriggerten Treffern konnte dieses Problem nicht beheben.
Eine Möglichkeit, die Zeitoffsets zwischen den DOMs einer DU unabhängig von unbekannten Offsets zwischen den DUs zu berechnen, bietet ein Zentrieren der Zeitresiduen um $0\,\mathrm{ns}$, da die Ergebnisse für eine Analyse mit und ohne artifiziellen Offset nur um einen konstanten Faktor verschoben sind. Dies wurde bisher allerdings nur für den trivialen Fall eines konstanten Offsets von $2\,\mathrm{ns}$ auf einer DU durchgeführt.
Um genauere Ergebnisse für die Zeitoffsets zwischen den DOMs zu erhalten, könnte man die verwendete Fitfunktion und deren Bereich variieren. Dabei bilden eine EMG-Verteilung, eine Breit-Wigner-Funktion oder eine Landauverteilung mögliche Alternativen zum Gaussfit. Außerdem könnten in weiteren Studien die Ergebnisse der Kalibration mit einzelnen DUs mit anderen Kalibrationsmethoden verglichen werden.

Literatur

[1] Owe Philipsen (2018): „Quantenfeldtheorie und das Standardmodell der Teilchenphysik“, Springer-Verlag, S.4, URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-57820-9

[2] C.L. Cowan et al. (1956): „Detection of the Free Neutrino: a Confirmation“, erschienen in: *Science*, 124 (3212), S.103, URL: http://science.sciencemag.org/content/124/3212/103

[3] Gordon Danby et al. (1962): „Observation of High-Energy Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos“, erschienen in: *Physical Review Letters*, 9, S.36

[4] K. Kodama et al. (2001): „Observation of tau neutrino interactions“, erschienen in: *Physics Letter B*, 504 (3), S.218, URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269301003070

[5] Oberauer, Judith und Lothar (2019): „Neutrinophysik“, Springer-Verlag, URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-59335-6

[6] Claus Grupen (2018): „Einstieg in die Astroteilchenphysik“, Springer-Verlag, 2.Auflage, URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-55271-1

[7] Adrián-Martínez et al (2016): „Letter of intent for KM3NeT 2.0“, erschienen in: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 43 (8), S.084001, URL: http://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/43/8/084001

[8] A. V. Akindinov (2019): „Letter of interest for a neutrino beam from Protvino to KM3NeT/ORCA“, erschienen in: *The European Physical Journal C*, 79, S.758, URL: https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7259-5

[9] S. Aiello et al. (2020): „Event reconstruction for KM3NeT/ORCA using convolutional neural networks“, vorbereitet zur Einreichung bei: *Journal of Instrumentation*

[10] Aus einer privaten Unterhaltung mit Edward Berbee entnommen

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Leuten meinen Dank aussprechen, die mich in den letzten Monaten unterstützt haben.
Ich bedanke mich bei Prof. Dr. Alexander Kappes für die Aufnahme in seine Arbeitsgruppe, die Möglichkeit meine Bachelorarbeit über dieses Thema anzufertigen und die Korrektur dieser Arbeit. Ich bedanke mich außerdem bei Prof. Dr. Christian Klein-Bösing für die Zweitkorrektur dieser Arbeit.
Mein ganz besonderer Dank gilt Daniel für die Betreuung und Unterstützung in den letzten Monaten. Trotz der räumlichen Distanz stand er mir während der gesamten Zeit bei Fragen immer zur Seite und fand stets schnell Lösungen zu den verschiedensten Problemen.
Ich möchte mich außerdem bei der gesamten Arbeitsgruppe dafür bedanken, dass sie mich so freundlich aufgenommen hat. Obwohl sich die gemeinsame Zeit im Büro auf wenige Wochen beschränkte, hat die Zusammenarbeit wirklich Spaß gemacht.
Als letztes möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, auf deren Unterstützung ich mich nicht nur in den letzten Monaten, sondern auch in all den Jahren davor stets verlassen konnte.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit über „Studien zur Optimierung der Detektorkalibration mit atmosphärischen Myonen bei KM3NeT/ORCA unter Verwendung einzelner vertikaler Detektoreinheiten“ selbstständig von mir und ohne fremde Hilfe verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind. Mir ist bekannt, dass es sich bei einem Plagiat um eine Täuschung handelt, die gemäß der Prüfungsordnung sanktioniert werden kann.

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

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

(Datum, Unterschrift)