



Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Bachelorarbeit

Studien zur Myon Rekonstruktion bei KM3NeT ORCA im Hinblick auf die Optimierung der Detektorkalibrierung mit atmosphärischen Myonen

Autor: Willem Achtermann (E-Mail: w_acht02@wwu.de)

Erstprüfer: Prof. Dr. Alexander Kappes

Zweitprüfer: Apl. Prof. Dr. Christian Klein-Bösing

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

AG Kappes
Institut für Kernphysik

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Neutrinodektektion	4
2.1	Neutrinos im Standardmodell	4
2.2	Cherenkov-Strahlung	5
2.3	Der KM3NeT Detektor	5
2.4	Lichtdetektion: Das digitale optische Modul (DOM)	7
3	Kalibrierung, Datenverarbeitung und Rekonstruktion	8
3.1	Kalibrierung des Detektors	8
3.2	Datenaufnahme und -verarbeitung	8
3.3	Rekonstruktion von Spurereignissen	9
3.3.1	JPrefit	10
3.3.2	JSimplex	11
3.3.3	JGandalf	11
4	Parameteranalyse und -optimierung	12
4.1	Güteparameter und Datenfilterung	12
4.1.1	Beispielanalyse	13
4.2	Number of events	15
4.3	Number of prefits	16
4.4	Grid angle	17
4.5	Zusammenhang zwischen grid angle und number of prefits	18
4.6	Roadwidth bei JPrefit	21
4.7	Tmax	21
4.8	Roadwidth bei JGandalf	22
4.9	Transit time spread (TTS)	24
4.10	TTS mit verändertem Detektor	25
4.11	Vergleich mit Realdaten	26
4.12	Finale Rekonstruktionsparametersätze	27
4.13	Einfluss von JSimplex auf die Rekonstruktion	28
5	Optimierung der auf atmosphärischen Myonen basierenden Kalibrierung	31
5.1	Funktionsweise der Methode	31
5.2	Vergleich der Leistung verschiedener Parametersätze	32
5.2.1	Zeitliche Kalibrierung	32
5.2.2	Rotationskalibrierung	34
6	Zusammenfassung und Ausblick	36

1 Einleitung

Seit Anbeginn der Zeit beschäftigt sich die Menschheit mit grundlegenden Fragen darüber, wo wir herkommen und wie die Natur beschaffen ist. Schon vor tausenden von Jahren wurden für die Beantwortung dieser Fragen Theorien darüber aufgestellt, wie zum Beispiel die Materie aufgebaut ist. Die alten Griechen beschrieben als erste das Atom als unteilbares kleinstes Teilchen, aus dem alles aufgebaut sei. Diese Theorien sind über die Zeit weiter verfeinert und getestet worden, sodass heute das Standardmodell der Teilchenphysik mit seinen 17 Teilchen die am besten belegte Theorie für die Beschreibung der Elementarteilchen ist. Eine besondere Gruppe in diesem Modell bilden die Neutrinos. Sie wurden 1930 von Wolfgang Pauli postuliert, um das kontinuierliche Energiespektrum des β -Zerfalls zu erklären. Experimentell wurden die Neutrinos 1956 durch den umgekehrten β -Zerfall nachgewiesen. Doch was macht diese Teilchen so besonders?

Im Gegensatz zu elektromagnetisch geladenen oder hadronischen Teilchen, wechselwirken Neutrinos nur mittels der schwachen Wechselwirkung. Daher ist die Wahrscheinlichkeit einer Interaktion mit Materie sehr gering. Aufgrund dieser Eigenschaft ist die Flugbahn von Neutrinos unverfälscht, wenn sie auf der Erde eintreffen. Durch ihre Detektion kann somit auf die Position von Neutrinoquellen, als welche zum Beispiel aktive galaktische Kerne gelten, geschlossen werden. Der geringe Wirkungsquerschnitt von Neutrinos bildet aber auch eine große Hürde für ihre Detektion. Daher wird für die Detektion eines Neutrinos ein großes Interaktionsvolumen benötigt. Das Experiment KM3NeT ist ein Neutrinooteleskop, welches ein solches Volumen besitzt. Dabei wird das Cherenkov Licht, das nach einer Neutrinointeraktion durch die dabei entstehenden Sekundärteilchen entsteht, mittels Lichtsensoren detektiert. Neben der Bestimmung der Position von Punktquellen kosmischer Neutrinos sollen weitere physikalische Eigenschaften, wie die Neutrinooszillation und die Hierarchie der Massenzustände der Neutrinos, untersucht werden. Neben den Neutrinos werden auch atmosphärische Myonen detektiert. Diese entstehen durch die Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit der Atmosphäre der Erde. Ausgehend von dem registrierten Licht kann die Flugbahn von Neutrinos oder Myonen rekonstruiert werden. Für eine genaue Rekonstruktion dieser ist eine präzise Kalibrierung des Detektors unerlässlich.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Rekonstruktion der Flugbahn von Myonen bei KM3NeT ORCA zu untersuchen und die Genauigkeit und die Dauer dieses Verfahrens zu optimieren. Abschließend werden die Erkenntnisse über die Myon Rekonstruktion genutzt, um eine Kalibrierungsmethode, die atmosphärische Myonen nutzt, zu optimieren.

2 Neutrinodektektion

Das Standardmodell der Teilchenphysik kann in zwei Teilchengruppen unterteilt werden. Zum einen gibt es die Bosonen, welche die Austauscheteilchen der vier Wechselwirkungen (starke, schwache, elektromagnetische und Gravitation) sind. Zum Anderen gibt es die Fermionen. Diese können erneut in Quarks und Leptonen unterteilt werden. Der hadronische Teil der Materie wird aus den Quarks aufgebaut. Es gibt insgesamt sechs von ihnen („up“, „down“, „strange“, „charm“, „top“ und „bottom“). Unter den Leptonen wird die „leichte“ Materie zusammengefasst. Dabei handelt es sich um das Elektron, das Myon, das Tau und ihre jeweiligen Neutrinos.

Die Neutrinos haben einen sehr geringen Wirkungsquerschnitt. Ihre Detektion in Neutrinooteleskopen erfolgt mittels des Cherenkov-Effekts. Dabei entsteht ein Lichtkegel, von dem die Richtung eines Neutrinos abgeleitet werden kann. Wegen ihren Eigenschaften werden für die Detektion von Neutrinos sehr große Volumina benötigt. Um den Bau von Neutrinooteleskopen zu vereinfachen, bedient man sich dabei an bereits vorhandenen, optisch durchsichtigen Materialien wie Wasser, Eis oder Luft.

2.1 Neutrinos im Standardmodell

Wie oben erwähnt gehören Neutrinos zu den Leptonen. Sie treten in drei verschiedenen Sorten (englisch „flavour“) auf. Es gibt das Elektron-Neutrino ν_e , das Myon-Neutrino ν_μ und das Tau-Neutrino ν_τ . Sie besitzen keine elektrische Ladung und haben nur eine sehr geringe, bislang unbestimmte Masse. Daher unterliegen sie nur der schwachen Wechselwirkung. Die Austauscheteilchen dieser Wechselwirkung sind die geladenen W^+, W^- Bosonen und das neutrale Z^0 Boson. Bei der Wechselwirkung wird dabei entsprechend der Ladung der Bosonen zwischen einem geladenen und einem neutralen Strom unterschieden. Die möglichen Wechselwirkungen sehen wie folgt aus

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

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

Dabei bezeichnet X einen hadronischen Partner mit dem das Neutrino wechselwirkt und $l = e, \mu, \tau$ die Neutrinosorte. Y bezeichnet den hadronischen Rest. Im Falle des neutralen Stroms (Gleichung (2.2)) wird ein Teil der Energie des Neutrinos an den hadronischen Teil übergeben. Anschließend folgt ein hadronischer Schauer. Beim geladenen Strom entsteht ein geladenes Lepton l , das einen Teil der Energie aufnimmt und anschließend mit der Materie wechselwirken kann. Für Neutrinoenergien über 10 GeV ist die Wechselwirkung durch tiefinelastische Streuung dominiert. Dabei streut das Neutrino entweder an einem Up-Quark oder an einem Down-Quark [7, 5].

Eine weitere Eigenschaft von propagierenden Neutrinos ist ihre Oszillation. Darunter versteht man die Umwandlung von einer Neutrinosorte in eine Andere. Diese Umwandlung hängt allerdings davon ab, ob sich das Neutrino durch Materie bewegt und wie dicht die Materie ist. Die Umwandlung kann durch die Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-Matrix beschrieben werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die flavour der Neutrinos aus drei verschiedenen Massenzuständen (m_1, m_2, m_3) aufgebaut sind. Die Differenzen $m_1^2 - m_2^2$ und $m_1^2 - m_3^2$ sind in anderen Experimenten bereits bestimmt. Die Hierarchie dieser Massenzustände ist bislang noch unbekannt. Es kann aber zwischen einer normalen ($m_3^2 > m_2^2 > m_1^2$) und einer invertierten Hierarchie ($m_2^2 > m_1^2 > m_3^2$) unterschieden werden. Die Bestimmung dieser Hierarchie ist ein Ziel des Neutrinooteleskops KM3NeT [3, 5, 1].

2.2 Cherenkov-Strahlung

Cherenkov Strahlung entsteht, wenn sich ein geladenes Teilchen schneller als Lichtgeschwindigkeit in einem polarisierbaren Medium bewegt. Die Strahlung entsteht durch induzierte Dipole.

In einem solchen Medium hat ein geladenes Teilchen zur Folge, dass sich das Medium entsprechend der Flugbahn des Teilchens polarisiert. Die Polarisation erfolgt mit der Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium $c_n = \frac{c_0}{n}$, wobei c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und n der Brechungsindex des Mediums ist. Bewegt sich das Teilchen mit Unterlichtgeschwindigkeit, so ist die Polarisation symmetrisch verteilt. Dadurch interferiert die Strahlung der Dipole destruktiv. Bewegt sich das Teilchen aber mit einer Geschwindigkeit, die über der Lichtgeschwindigkeit im Medium c_n liegt, interferiert die Strahlung konstruktiv. Abb. 1 zeigt dieses Phänomen schematisch. Dabei ist $\Delta x = v \cdot t$

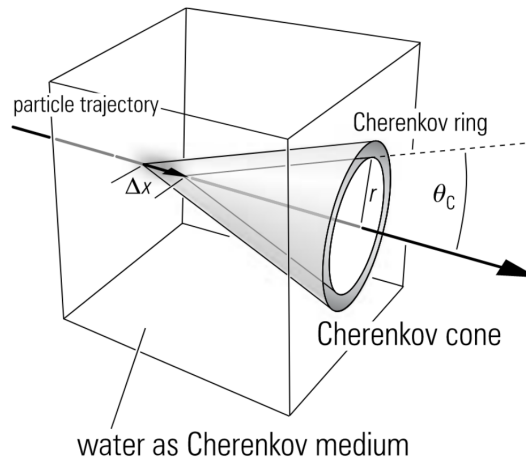


Abbildung 1: Ausbreitung eines Cherenkov-Rings in einem Medium. Entnommen aus [7].

die vom Teilchen zurückgelegte Strecke. Das Cherenkov-Licht wird in einem Kegel mit Öffnungswinkel

$$\theta_C = \arccos\left(\frac{c_0}{n \cdot v}\right) \quad (2.3)$$

um die Flugbahn des Teilchens emittiert. Unter der Annahme eines nahezu c_0 schnellen Teilchens und einem Brechungsindex von Wasser von $n_{\text{Wasser}} = 1,33$ [4] ergibt sich ein Öffnungswinkel von $\theta_C = 41,24^\circ$ [5, 7].

2.3 Der KM3NeT Detektor

KM3NeT ist der Name einer hauptsächlich europäischen Kollaboration, die für den Bau und Betrieb eines Neutrinooteleskops im Mittelmeer zuständig ist. In einer ersten Phase werden Daten mit einem Teildetektor aufgenommen, um die Infrastruktur von KM3NeT zu testen und optimiert. In der zweiten Phase sollen die Kontruktionarbeiten vollendet werden. KM3NeT ist auf drei Standorte in der Nähe von Toulon (Frankreich), Portopalo di Capo Passero (Italien) und Pylos (Griechenland) verteilt. Es wird zu zwei verschiedenen Zwecken errichtet [2].

Zum einen soll der ARCA Detektor („Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss“) hochenergetische Neutrinos detektieren und aus deren Flugbahn auf die Position von Punktquellen wie aktiven galaktischen Kernen u.Ä. schließen. Die Energien können

bis in dem PeV-Bereich liegen [2].

Zum Anderen gibt es den ORCA Detektor („Oscillation Research with Cosmics in the Abyss“). Dieser ist für geringere Energien optimiert und soll die Hierarchie der Massenzustände von Neutrinos bestimmen. Außerdem können Tau-Neutrinos ν_τ , die durch die Neutrinooszillation von atmosphärischen Neutrinos der anderen Flavour entstehen, detektiert werden. Die Energie ist dabei im GeV-Bereich [2, 3].

Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsbereiche und den daraus resultierenden Energien, werden unterschiedliche Detektorgeometrien benötigt. KM3NeT ist in drei Blöcke unterteilt. Ein Block besteht aus 115 Detektionseinheiten (DUs), die mit jeweils 18 Lichtsensoren bestückt sind. In Abb. 2 ist der schematische Aufbau des ORCA De-

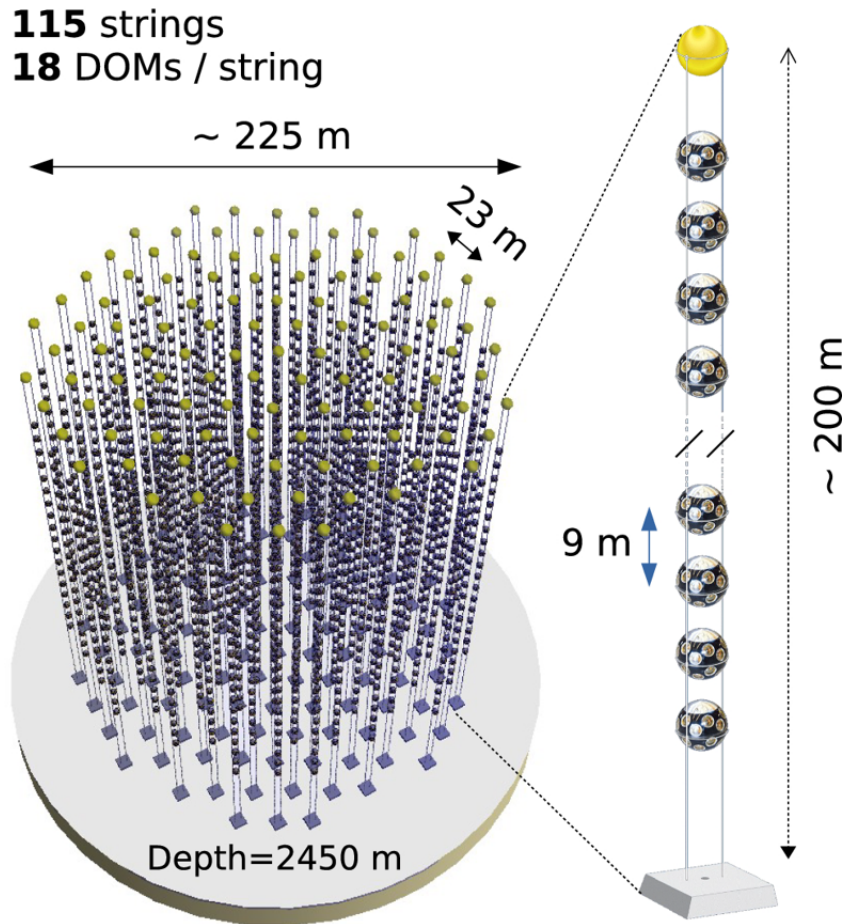


Abbildung 2: Schematische Darstellung des geplanten ORCA Detektors. Entnommen aus [3].

tektors gezeigt. Dieser wird 40 km vor der französischen Küste in einer Tiefe von 2450 m gebaut. Der vertikale Abstand zwischen den Lichtsensoren beträgt 9 m, beginnend 40 m über dem Meeresboden. Die DUs sind im Mittel 20 m von einander entfernt und es sind aktuell sechs DUs in Betrieb. Im Laufe des Jahres sollen weitere installiert werden. Das geplante Volumen beträgt 8 Mt.

Der ARCA Detektor ist 100 km vor der sizilianischen Küste in Italien in einer Tiefe von 3500 m aufgestellt. Er soll aus zwei Blöcken bestehen. Die DUs haben im Mittel einen horizontalen Abstand von 95 m. Der vertikale Abstand zwischen den Lichtsensoren beträgt 36 m, beginnend 80 m über dem Meeresboden. Aktuell ist für ARCA ein Strang aufgestellt. Das geplante Volumen liegt bei 500 Mt pro Block [2].

2.4 Lichtdetektion: Das digitale optische Modul (DOM)

Die Lichtsensoren im Detektor werden als digitale optische Module (DOMs) bezeichnet. Die schematische Anordnung der DOMs in einer DU und eine Nahaufnahme eines



Abbildung 3: Schematische Darstellung einer DU (links). Nahaufnahme eines DOMs (rechts). Entnommen aus [2].

DOMs sind in Abb. 3 zu sehen. Bei einem DOM handelt es sich um einen Glasbehälter mit einem Durchmesser von 42 cm in dem 31 Photomultiplier Tubes (PMTs) enthalten sind. Die PMTs stecken in einer Haltestruktur und decken einen großen Teil der Oberfläche des Doms ab. Jedes DOM enthält neben der Elektronik zur Datenaufnahme noch weitere Bauteile. Es ist ein Ultraschallsensor und ein Kompass verbaut. Außerdem gibt es eine LED. Die Datenübertragung wird mit einer Glasfaser pro DOM gewährleistet. Die Stromversorgung erfolgt über zwei Kupferkabel [2].

3 Kalibrierung, Datenverarbeitung und Rekonstruktion

In den folgenden Abschnitten soll erläutert werden, mit welchen Methoden der Detektor kalibriert werden kann und wie die Datenaufnahme und die Rekonstruktion von Ereignissen abläuft.

3.1 Kalibrierung des Detektors

Für genaues Arbeiten mit dem Detektor wird eine präzise Kalibrierung benötigt. Diese erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden die verbauten PMTs in den DOMs auf ihre physikalischen Eigenschaften (Quanteneffizienz, Dunkelrate, etc.) getestet. Außerdem werden die Abmessungen und Laufzeiten eines Stranges an Land bestimmt. Die Installation jedes Stranges erfolgt mit Hilfe eines Roboters. Die GPS Koordinaten des Standortes und die Abmessungen an Land dienen als Startpunkt für die folgenden Kalibrierungsmöglichkeiten. Mit diesen soll eine Kalibrierung mit einer Genauigkeit im Bereich von ns und dm erreicht werden.

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, besitzt jedes DOM einen Ultraschallsensor. Mit Ultraschallwellen unter Wasser kann so die Position jedes DOMs trianguliert werden. Außerdem ist ein Kompass eingebaut, welcher Informationen über Drehungen und Neigungen des DOMs gibt. Für eine Kalibrierung innerhalb eines Stranges ist an jedem DOM oben eine LED angebracht, mit der der Abstand zur nächsten höherliegenden DOM bestimmt werden kann.

Die Kalibrierungsmethode, mit der sich diese Arbeit befasst, nutzt atmosphärische Myonen. Dabei werden bei der Rekonstruktion von Ereignissen unterschiedliche Detektorgeometrien angenommen und beobachtet, bei welchen Geometrien die besten Rekonstruktionsergebnisse erzielt werden. Eine genauere Beschreibung des Verfahrens ist in Abschnitt 5.1 beschrieben. Damit ist es möglich, die gesamte Geometrie des Detektors, also die Position, den Zeitversatz, den Drehwinkel und die Streckung jeder DU, zu bestimmen. Aber auch eine zeitliche Kalibrierung der DOMs innerhalb einer DU ist möglich.

3.2 Datenaufnahme und -verarbeitung

Grundsätzlich wird zwischen zwei Arten von Ereignissen unterschieden. Es gibt Spurereignisse und Kaskadenereignisse. Wechselwirkungen, bei denen ein Myon entsteht werden als Spurereignisse verstanden. Das Myon hat nämlich die Eigenschaft, eine verhältnismäßig weite Strecke zurückzulegen, bevor es die Energie deponiert hat. Wenn bei der Wechselwirkung ein Elektron entsteht oder Hadronen die Energie des Neutrinos aufnehmen, wird dies als Kaskade bezeichnet. Die Rekonstruktion dieser beiden Ereignisgruppen unterscheidet sich. In dieser Arbeit werden nur Spurereignisse behandelt und im folgenden sind auch nur solche gemeint.

Die Datenaufnahme bei KM3NeT beruht auf dem „All-data-to-shore“ Prinzip. Das bedeutet, dass die gesamten Daten ans Land übertragen und dort ausgewertet werden. In den Daten sind auch Untergrundsignale enthalten, die nicht zu einem Ereignis gehören. Der Untergrund entsteht größtenteils durch ^{40}K Zerfälle oder Biolumineszenz (Licht von Bakterien). Um Daten einzelnen Ereignissen, die durch Teilcheninteraktion induziert werden, zuzuordnen, werden diverse Trigger angewandt. Eine genaue Beschreibung ist in [2] zu finden. Ein speziell für die Detektion von Spurereignissen entwickelter Trigger ist ein Richtungsfilter. Dabei wird die Richtung der Flugbahn des Myon abgeschätzt und ein Zylinder in das 3D Gitter der DOMs gesetzt. Der Durchmesser dieses Zylinders

ders bestimmt nun, welche Treffer zu dem Ereignis gehören. Abb. 4 zeigt die Messung

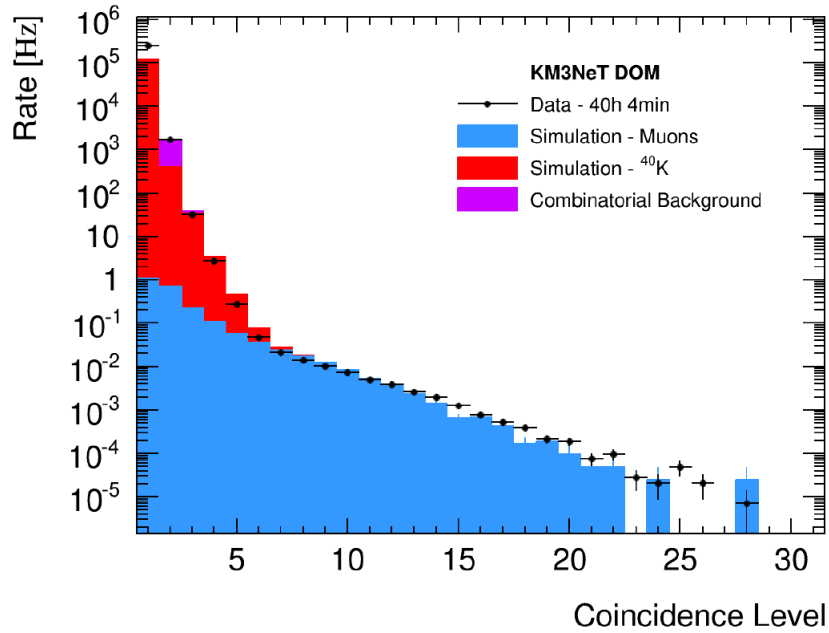


Abbildung 4: Ereignisrate in Abhängigkeit der Anzahl der Treffer in verschiedenen PMTs innerhalb einer 20 ns Zeitspanne. Es sind sowohl aufgenommene, als auch simulierte Daten gezeigt. Entnommen aus [6].

der Ereignisrate in Abhängigkeit der Anzahl angeregter PMTs innerhalb von 20 ns mit einem Prototypen des DOM. Durch Anwendung der Trigger ist es möglich, das Verhältnis zwischen dem Signal des Ereignisses und Untergrundrauschen um einen Faktor von bis zu 10^4 zu verbessern [2, 6].

Es wird weiterhin zwischen Realdaten und Monte-Carlo Daten (MC-Daten) unterschieden. Die Realdaten sind die tatsächlich aufgenommenen Signale in den PMTs. MC-Daten sind simulierte Daten, die nach dem Prinzip der Monte-Carlo Simulation generiert sind. Abb. 4 zeigt den Vergleich zwischen aufgenommenen und simulierten Daten. Dabei werden anhand von generierten Flugbahnen die Treffer in den PMTs simuliert. Zusätzlich dazu werden aber auch Untergrundsignale und Signale von ^{40}K Zerfällen simuliert. Zusammengefasst spiegeln die simulierten Beiträge zum Signal die realen Daten wieder. In dieser Arbeit werden zum Großteil MC-Daten des ORCA Detektors verwendet und einzelne Vergleiche mit realen Daten gezogen.

3.3 Rekonstruktion von Spurereignissen

In diesem Unterkapitel wird die Rekonstruktion von Spurereignissen erläutert. Die Rekonstruktion bedeutet in diesem Fall das Fitten von einem Modell an Daten. Für Spurereignisse ist dieses Modell die Ausbreitung des Lichtes und die daraus resultierenden Treffer im Detektor bei einer bestimmten Teilcheninteraktion. Mit der Rekonstruktion eines Ereignisses sollen die Parameter der Flugbahn (Startposition, -zeitpunkt und Richtung) ermittelt werden. Daraus ergibt sich ein nichtlineares Fitproblem für dessen Lösung komplizierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (englisch: „probability density function“, PDFs) genutzt werden. Diese PDFs sagen voraus, wie viele Photonen zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort zu erwarten sind, wenn ein Ereignis mit vorgegebener Richtung und Interaktionspunkt angenommen wird. Für das Fitten

sind mehrere Programme notwendig, die in der Komplexität immer weiter steigen. Als Standardrekonstruktionskette wird die Abfolge der Programme „JPrefit“ (einem linearen Fit) und „JGandalf“ (einem Likelihoodfit) bezeichnet. Es ist allerdings möglich, zwischen JPrefit und JGandalf weitere Programme anzuwenden, um das Ergebnis zu verbessern.

3.3.1 JPrefit

Zu Beginn wird das Programm JPrefit ausgeführt. Die Aufgabe von JPrefit ist es, eine lineare Regression an die Daten durchzuführen. Dazu werden die fünf Parameter (Startort (x_0, y_0) und -zeitpunkt (t_0) der Flugbahn sowie die Richtung (θ, ϕ)) durch Vorgabe der Richtung auf drei (x_0, y_0, t_0) reduziert. An die Startposition und den Startzeitpunkt des Ereignisses kann nun linear für verschiedene Richtungen gefittet werden. Vor den Fits werden die Treffer, die verwendet werden, anhand von örtlicher und zeitlicher Kausalität ausgewählt. Die Fits werden im späteren Verlauf der Rekonstruktion weiter verarbeitet und dienen als Anfangsparameter für JGandalf. Der Quellcode von JPrefit ist in [9] zu finden.

Für das Erstellen der Fits benötigt JPrefit einige Informationen und Parameter. Als erstes muss die Detektorgeometrie festgelegt werden, anhand derer die Daten verarbeitet werden. Im ersten Teil dieser Arbeit wird die Güte der Rekonstruktion in Abhängigkeit der einstellbaren Parameter quantifiziert. Die folgende Auflistung soll die Parameter für den JPrefit näher erläutern.

- **grid angle:**
Der Parameter *grid angle* gibt an, wie fein der Himmel in Richtungen unterteilt wird. JPrefit legt dabei ein Gitter über den Himmel. Der *grid angle* gibt nun an, wie weit ein beliebiger Punkt am Himmel von diesem Gitter maximal entfernt sein kann. Im Mittel hat ein Punkt also einen Abstand von $\frac{1}{2}(\text{grid angle})$ vom Gitter. Der Standardwert für den *grid angle* beträgt 5° .
- **number of prefits:**
Der Parameter *number of prefits* gibt an, wie viele der gemachten Fits pro rekonstruiertem Ereignis JPrefit für die weitere Rekonstruktion abspeichert. Der Standardwert für die *number of prefits* beträgt 36 und die Flugbahnen werden nach dem χ^2 des linearen Fits sortiert.
- **number of events:**
Die *number of events* gibt an, wie viele Ereignisse aus den Daten rekonstruiert werden sollen. Wird kein Wert angegeben, so verwendet JPrefit alle Ereignisse, die in der Datei enthalten sind.
- **roadwidth:**
Die *roadwidth* ist als Ausschlussbedingung für Treffer zu verstehen. Sie kann mit dem Richtungsfilter (siehe Abschnitt 3.2) verglichen werden. Das bedeutet sie ist ein Maß dafür, welche Daten für die Rekonstruktion verwendet werden. Die *roadwidth* speziell gibt an, wie weit die Treffer in den DOMs auseinander liegen dürfen, damit sie noch in der Rekonstruktion beachtet werden. Der Standardwert für die *roadwidth* beträgt 50 m.
- **tmax:**
Der Parameter *tmax* ist ebenfalls eine Ausschlussbedingung für Treffer. Er ist ein Maß dafür, welchen zeitlichen Unterschied Treffer zum erwarteten Zeitpunkt

haben dürfen, damit sie bei der Rekonstruktion berücksichtigt werden. Der Standardwert für t_{max} beträgt 18 ns.

3.3.2 JSimplex

Das Programm JSimplex ist optional in der Rekonstruktionskette. Es wird zwischen JPrefit und JGandalf ausgeführt. Die Aufgabe von JSimplex ist es, die von JPrefit ausgegebenen Flugbahnen zu verbessern. Bei dieser Fitstufe werden nun alle fünf Parameter $(x_0, y_0, t_0, \theta, \phi)$ ausgehend von den Ergebnissen von JPrefit gefittet. Bei JSimplex handelt es sich um einen nicht-linearen Fit. Damit ist JSimplex im Hinblick auf die Rechenleistung anspruchsvoller als JPrefit. Der Quellcode von JSimplex kann in [10] eingesehen werden.

3.3.3 JGandalf

Das Programm JGandalf liefert die höchste Präzision und wird in der Rekonstruktionskette als letztes ausgeführt. Dabei wird ein Likelihood-Fit verwendet. Im Fall des JGandalf wird für jeden beobachteten Treffer in einem Ereignis eine Wahrscheinlichkeit errechnet, dass dieser Treffer unter den Vorhersagen der PDF zu diesem Zeitpunkt registriert wird. Für jeden Treffer werden von JGandalf der Abstand zur Flugbahn, die Ausrichtung der PMTs und die Ankunftszeit des ersten Photons berücksichtigt. Durch Summierung über die Logarithmen der Wahrscheinlichkeiten aller Treffer ergibt sich ein Wert, der beschreibt, wie gut die aufgezeichneten Daten zu den Eigenschaften der Flugbahn passen. Dieser Wert wird im Folgenden als Likelihood bezeichnet. Zur Optimierung der Likelihood wird ein Levenberg-Marquardt Algorithmus verwendet, welcher sich zum Fitten von nichtlinearen Problemen eignet jedoch nicht zwangsläufig das globale Optimum findet. Dieser Algorithmus beruht zum Teil auf der Berechnung von Gradienten, um zu konvergieren. Daher ist es für das Konvergieren des Fits wichtig, dass JGandalf möglichst genaue Anfangsbedingungen gegeben werden. Der Quellcode von JGandalf ist in [8] zu finden.

Auch JGandalf benötigt einige Eingaben. Als Erstes muss wieder die Detektorgeometrie festgelegt werden. Außerdem wird ein Datensatz benötigt, in dem die Anfangsbedingungen für jedes Ereignis enthalten sind (also die Ausgabedatei des Vorgängers). Neben diesen Informationen kann die Rekonstruktion durch einige Parameter beeinflusst werden. Hier werden nur die für diese Arbeit relevanten Parameter aufgeführt. Wie auch JPrefit hat JGandalf den Parameter *roadwidth*, welcher allerdings nur zur Beschleunigung des Programms dient. Der Einfluss von Untergrundtreffern wird bereits durch die verwendete Methode stark unterdrückt. Neben der *roadwidth* gibt es den Parameter *TTS*. Dieser wird bei der Berechnung der oben beschriebenen Wahrscheinlichkeit genutzt, um die zeitliche Information der Treffer zu verschmieren und die zeitliche Auflösung der PMTs zu berücksichtigen. Der Standardwert für die *roadwidth* beträgt 50 m und für *TTS* 2 ns.

4 Parameteranalyse und -optimierung

In diesem Kapitel werden die Studien der Myon Rekonstruktion bei KM3NeT ORCA dargestellt. Dazu werden Myon MC-Daten des ORCA7 Detektors verwendet. Der simulierte Detektor besteht aus sieben Detektionseinheiten (DUs), die in einer Dreier- und einer Viererreihe angeordnet sind. Am Anfang werden die Güteparameter der Rekonstruktion erklärt und anhand eines Beispiels gezeigt. Darauf folgt die Analyse der einzelnen Rekonstruktionsparameter (siehe Abschnitt 3.3). Anschließend wird ein Vergleich zwischen MC-Daten und Realdaten gemacht. Mit den Ergebnissen aus den Analysen werden dann Parametersätze definiert, die später in der Kalibrierung getestet werden sollen. Abschließend werden die Auswirkungen des Programms JSimplex gezeigt.

4.1 Güteparameter und Datenfilterung

Nachdem eine Rekonstruktion durchgeführt wurde, folgt die Datenanalyse. Hierbei ist es sinnvoll noch eine Filterung der rekonstruierten Daten vorzunehmen. Dazu wird bestimmt, aus wie vielen unterschiedlichen DOMs die Treffer für die Rekonstruktion eines Ereignisses stammen. Die Verteilung der Anzahl getroffener DOMs für 200 000 Ereignisse ist in Abb. 5 zu sehen. Je größer die Anzahl der getroffenen DOMs ist,

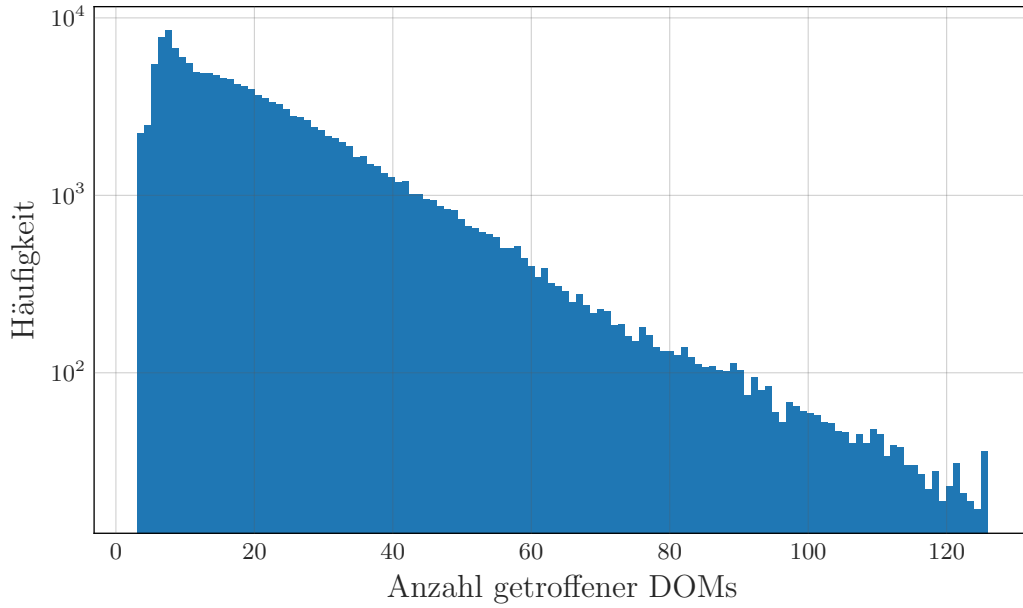


Abbildung 5: Verteilung der Anzahl getroffener DOMs aller rekonstruierter Flugbahnen. Für die Rekonstruktion werden Myon MC-Daten des ORCA7 Detektors und Standardwerte verwendet. Insgesamt wurden 200.000 Ereignisse rekonstruiert.

desto mehr Treffer stehen für die Rekonstruktion zur Verfügung. Dieser Filter soll die Qualität der Ergebnisse verbessern, indem kleine Ereignisse, welche im Allgemeinen komplizierter zu rekonstruieren sind, nicht in der Analyse berücksichtigt werden. Im Fall von Myon MC-Daten des ORCA7 Detektors wurde dieser Wert auf zehn DOMs festgelegt. Es müssen also $\approx 8\%$ der DOMs im Detektor getroffen werden. Außerdem ist zu sehen, dass die Anzahl der getroffenen DOMs einen bestimmten Wert über Null nicht unterschreitet. Dies ist auf die in Abschnitt 3.2 erwähnten Trigger zurückzuführen. Als nächstes werden die Güteparameter erklärt. Unter einem Güteparameter wird ein

Wert verstanden, der die Qualität der Rekonstruktion quantifiziert. Im folgenden sollen die hier verwendeten Güteparameter erläutert werden.

- **Winkel zwischen rekonstruierter und wahrer Flugbahn:**

Bei der Rekonstruktion von MC-Daten ist neben der rekonstruierten (rek) auch die wahre (wahr) Flugbahn enthalten. Aus den Richtungsvektoren \vec{T}_{rek} und \vec{T}_{wahr} kann mittels Gleichung (4.1) der Winkel ϑ zwischen diesen Flugbahnen berechnet werden.

$$\vartheta = \frac{\arccos\left(\frac{\vec{T}_{\text{rek}} \cdot \vec{T}_{\text{wahr}}}{|\vec{T}_{\text{rek}}| \cdot |\vec{T}_{\text{wahr}}|}\right)}{|\vec{T}_{\text{rek}}| \cdot |\vec{T}_{\text{wahr}}|} \quad (4.1)$$

Je größer dieser Winkel ist, desto schlechter kann die wahre Flugbahn rekonstruiert werden.

- **Normierte Likelihood:**

Dieser Parameter wird den Spuren während der Rekonstruktion durch JGandalf zugeordnet. Seine Bedeutung ist in Abschnitt 3.3.3 geschildert. Ein höherer Wert ist steht für einen besseren Fit. Für eine gleiche Gewichtung von verschiedenen langen Flugbahnen wird die absolute Likelihood auf die für die Rekonstruktion verwendeten Treffer normiert.

Anhand dieser Güteparameter werden im folgenden die Rekonstruktionen quantifiziert. Es wird weiterhin die Laufzeit der Rekonstruktionskette aufgenommen, da ein weiterer wichtiger Teil dieser Arbeit die Laufzeitoptimierung dieser ist.

4.1.1 Beispielanalyse

Anhand eines Beispiels soll nun die Quantifizierung der Rekonstruktion gezeigt werden. Dafür werden die in Abschnitt 3.3.1 und Abschnitt 3.3.3 angegebenen Standardparameter verwendet. Insgesamt werden 200 000 Ereignisse rekonstruiert. Aus den gespeicherten Daten der Flugbahnen werden die in Abschnitt 4.1 genannten Güteparameter berechnet. Aus den Richtungsvektoren kann mittels Gleichung (4.1) der Winkel ϑ zwischen der rekonstruierten und der wahren Flugbahn berechnet werden. Berechnet man diesen Winkel für alle Ereignisse, so ergibt sich das in Abb. 6 gezeigte Histogramm. Aus diesem Histogramm wird ein Median berechnet, damit das zweite Maximum bei $\approx 90^\circ$ nicht so stark gewichtet wird. Dieses Maximum entsteht durch einen systematischen Fehler in der Rekonstruktion und entspricht dem zweifachen Öffnungswinkel des Cherenkovkegels (siehe Abschnitt 2.2). Eine bessere Rekonstruktion kann auch über die Ausgeprägtheit dieses Maximums charakterisiert werden. Ein kleineres Nebenmaximum bedeutet eine bessere Rekonstruktion.

Eine typische Verteilung der normierten Likelihood ist in Abb. 7 zu sehen. Als Güteparameter wird die normierte Likelihood verwendet, welche auf die für die Rekonstruktion verwendeten Treffer normiert wird. Auch aus diesem Histogramm wird der Median berechnet und als Güteparameter für die Rekonstruktion verwendet.

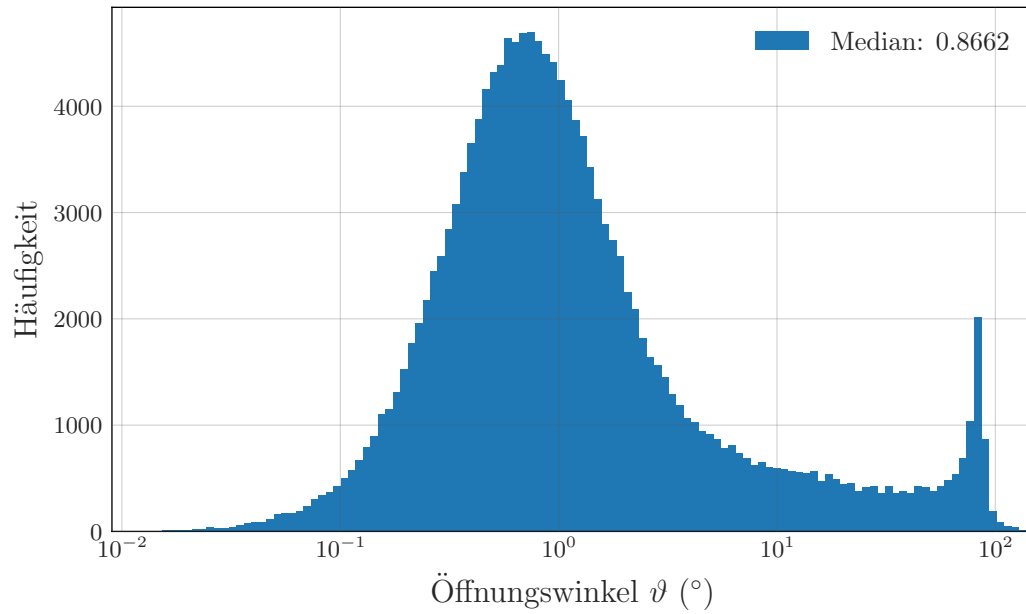


Abbildung 6: Verteilung des Winkels zwischen den rekonstruierten Flugbahnen und den bekannten Monte-Carlo Flugbahnen.

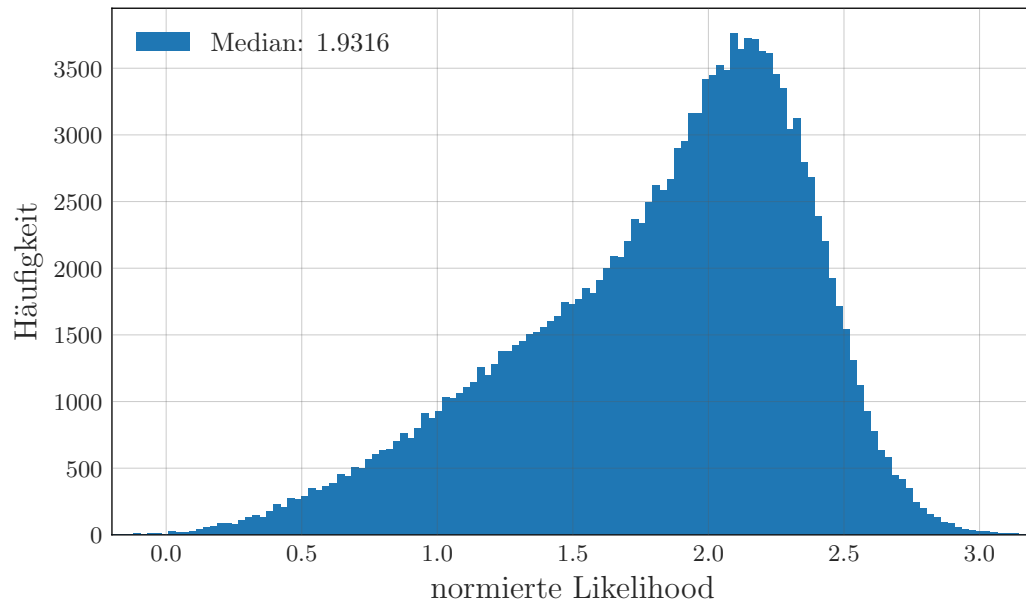


Abbildung 7: Verteilung der normierten Likelihood der rekonstruierten Flugbahnen.

4.2 Number of events

Zunächst ist es sinnvoll die *number of events* zu betrachten. Anhand des Verlaufs können Aussagen über die statistischen Schwankungen gemacht werden. Abb. 8 zeigt den Ver-

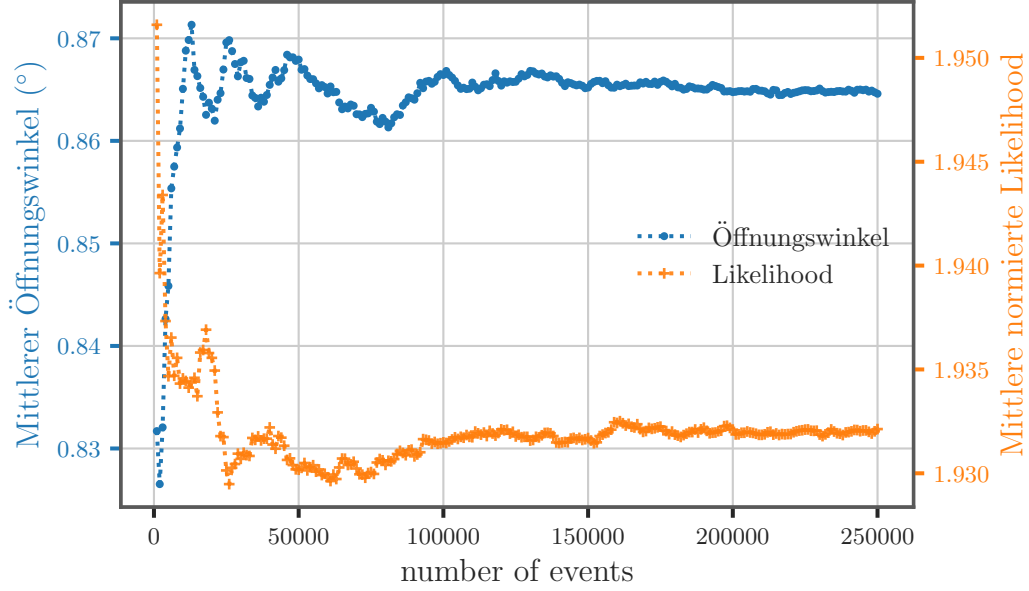


Abbildung 8: Verlauf des mittleren Öffnungswinkel und der mittleren normierten Likelihood gegen die *number of events*.

lauf des mittleren Öffnungswinkel zwischen der rekonstruierten und der MC-Flugbahn und die mittlere normierte Likelihood gegen die *number of events*. Es ist zu erkennen, dass ab einem Wert von $\approx 100\,000$ Ereignissen die Schwankungen gering werden. Neben der Qualität der Rekonstruktionen wird auch die Laufzeit überwacht. Diese ist in Abb. 9 zu sehen. Es ist ein eindeutiger linearer Zusammenhang zwischen der Laufzeit und der Anzahl der zu rekonstruierenden Ereignisse in beiden Programmen zu sehen. Der Ausbruch der Laufzeit bei 10 000 Ereignissen stammt wahrscheinlich aus einer Verzögerung auf Seiten des Rechenzentrums, in dem alle Berechnungen stattfinden. In den folgenden Analysen werden immer 200 000 Ereignisse rekonstruiert, sofern es nicht anders erwähnt wird.

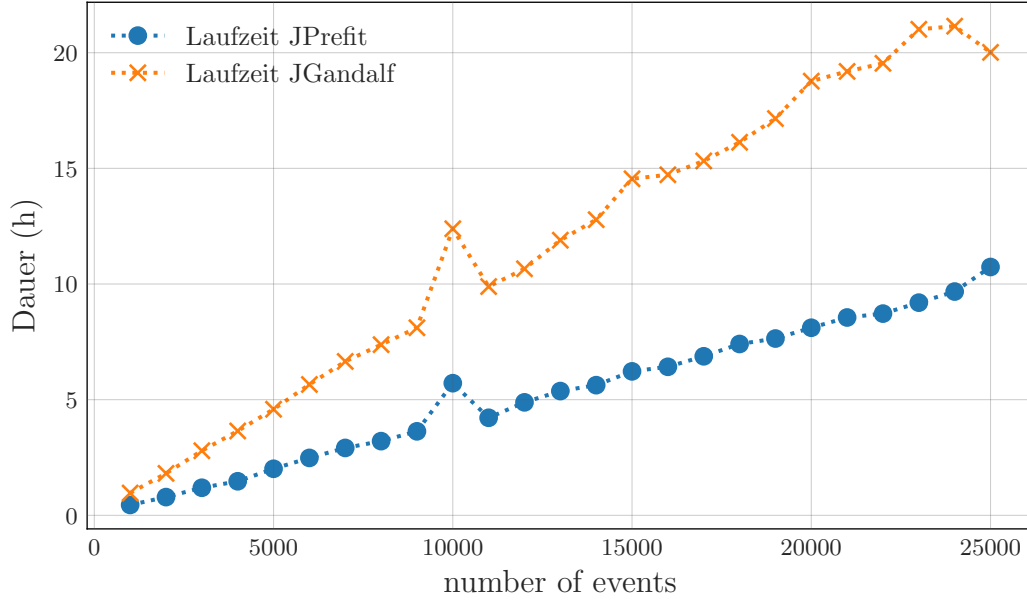


Abbildung 9: Verlauf der Laufzeit des JPrefit und JGandalf in Abhängigkeit der *number of events*.

4.3 Number of prefits

Der Verlauf des mittleren Öffnungswinkel und der normierten Likelihood in Abhängigkeit der *number of prefits* ist in Abb. 10 dargestellt. Außerdem ist die Laufzeit von JGandalf aufgetragen. Die Laufzeit von JPrefit ist nahezu konstant, da die *number of prefits* für dieses Programm nur bestimmt, wie viele Fits pro Ereignis gespeichert und weitergegeben werden soll. Es kann also gesagt werden, dass mehr Auswahlmöglichkeiten für JGandalf zu einem besseren Ergebnis führen. Ebenso passt der Verlauf des Öffnungswinkel gut zu dem Verlauf der normierten Likelihood. Die Laufzeit des JGandalf steigt linear mit der *number of prefits* an. Für eine laufzeitorientierte Rekonstruktion sollten also möglichst geringe Werte und für eine leistungsorientierte Rekonstruktion möglichst hohe Werte für *number of prefits* gewählt werden.

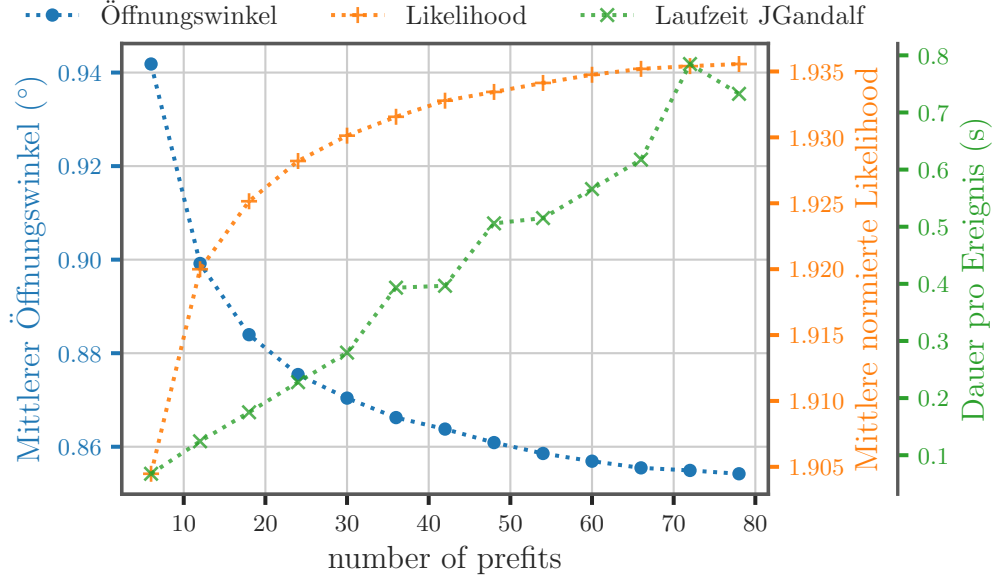


Abbildung 10: Verlauf des mittleren Öffnungswinkel und normierten Likelihood in Abhängigkeit der *number of prefits*. Dazu die Laufzeit des JGandalf.

4.4 Grid angle

Als nächstes wird der Parameter *grid angle* betrachtet. Der Verlauf des Öffnungswinkel und der normierten Likelihood ist in Abb. 11 zu sehen. Außerdem ist die Laufzeit des JPrefit aufgetragen. Die Laufzeit des JGandalf ändert sich nicht in Abhängigkeit des *grid angle*, obwohl man erwarten könnte, dass dieser mehr Arbeit verrichten muss, wenn schlechtere Anfangsbedingungen gegeben sind.

Entgegen der Erwartung ist eine Verschlechterung der Leistung bei sehr kleinem *grid angle* ($\leq 3^\circ$) zu sehen. Dies liegt daran, dass bei zu kleinem *grid angle* in Kombination mit einer geringen *number of prefits* nur die Fits an JGandalf weitergegeben werden, die auf das gleiche lokale Optimum, aber nicht zwangsläufig das globale Optimum, führen. Im Hinblick auf eine Leistungs- und Laufzeitoptimierung sollte ein *grid angle* zwischen 3° und 8° gewählt werden. Unterhalb dieses Bereichs nimmt die Leistung wieder ab und die Laufzeit verschlechtert sich dramatisch. Über diesem Bereich nimmt die Leistung sehr stark ab und die Abnahme der Laufzeit ist nicht mehr sehr groß.

Im nächsten Abschnitt soll nun untersucht werden, ob die Leistung bei kleinen *grid angle* durch eine höhere *number of prefits* ausgeglichen werden kann.

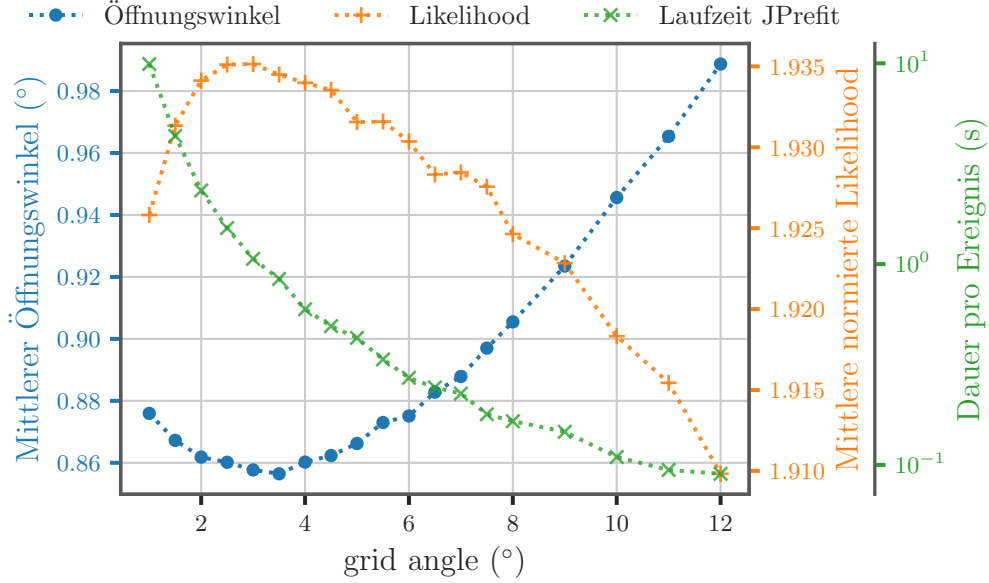


Abbildung 11: Verlauf des Öffnungswinkel und normierten Likelihood in Abhängigkeit des *grid angle* bei Myon MC-Daten. Außerdem ist die Laufzeit des JPRefit zu sehen.

4.5 Zusammenhang zwischen *grid angle* und *number of prefits*

Es soll nun die Leistung in Abhängigkeit des *grid angle* und der *number of prefits* ermittelt werden. Die Analyse des Öffnungswinkel ist in Abb. 12 zu sehen. Es ist eine Überlagerung der in Abschnitt 4.4 und Abschnitt 4.3 gezeigten Verläufe zu erkennen. Die besten Leistungen sind weiterhin bei einem *grid angle* von $\approx 3^\circ$ zu erkennen. Auch hier zeigt sich, dass eine größere Menge an Startparametern für JGandalf im Allgemeinen für bessere Ergebnisse sorgt. Abb. 13 zeigt den Verlauf der normierten Likelihood in Abhängigkeit des *grid angle* und der *number of prefits*. Der Verlauf spiegelt die Ergebnisse vom Öffnungswinkel gut wieder. Auch hier ist die Überlagerung von *grid angle* und *number of prefits* zu erkennen. Die Gesamtlaufzeit der Rekonstruktionskette ist in Abb. 14 dargestellt. Um die Rekonstruktion im Hinblick auf die Laufzeit zu optimieren, sollten hohe *grid angle* und geringe *number of prefits* gewählt werden. Für die jeweiligen Bedürfnisse (Laufzeit oder Leistung) können aber auch andere Wertepaare angenommen werden. Es ist weiterhin zu sehen, dass die Leistung für kleine *grid angle* mit wachsender *number of prefits* besser wird.

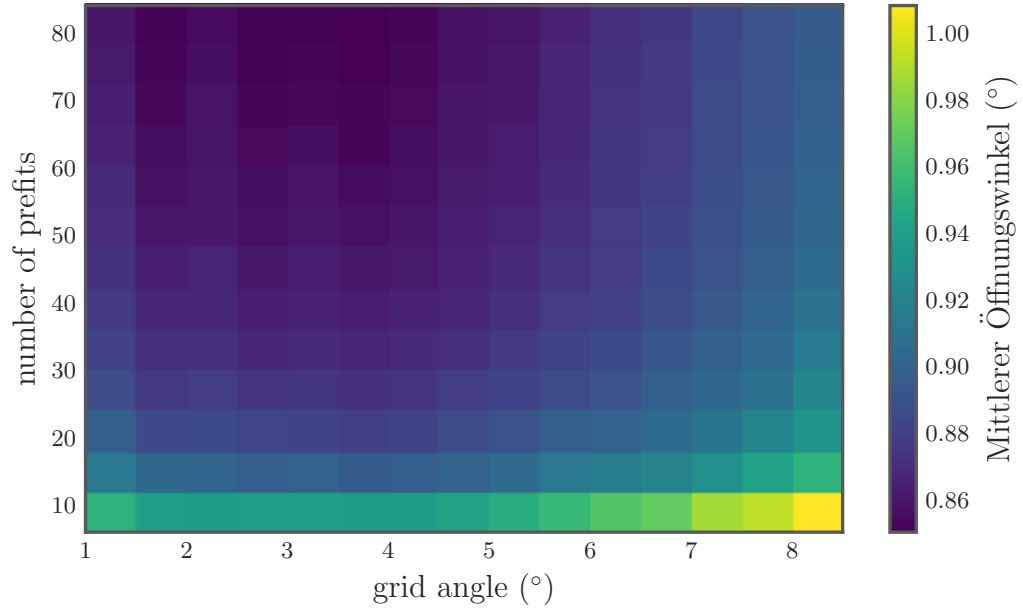


Abbildung 12: Verlauf des Öffnungswinkel in Abhängigkeit des *grid angle* und der *number of prefits*.

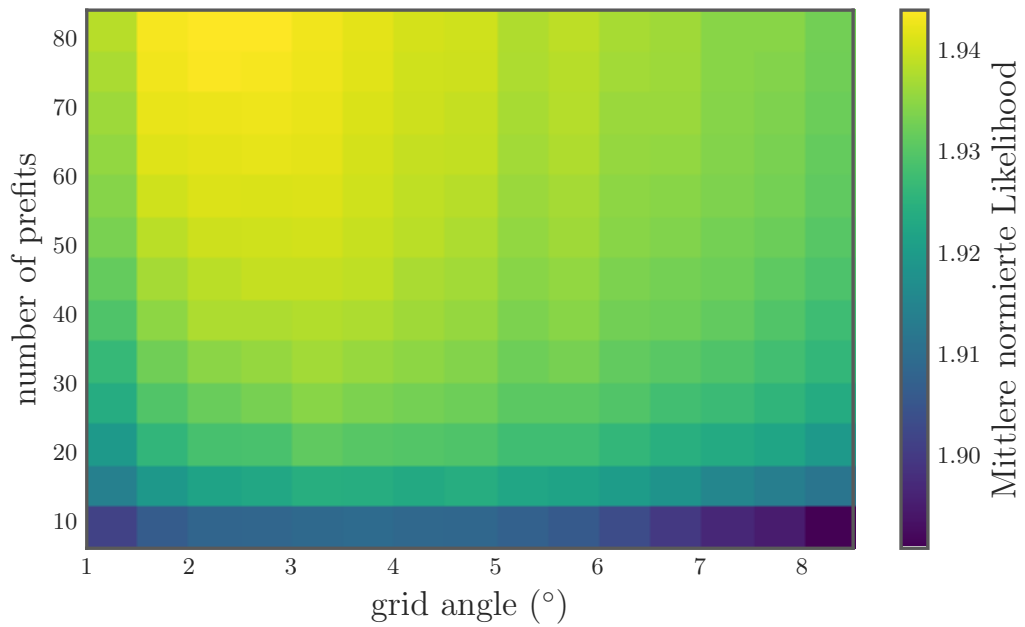


Abbildung 13: Verlauf der normierten Likelihood in Abhängigkeit des *grid angle* und der *number of prefits*.

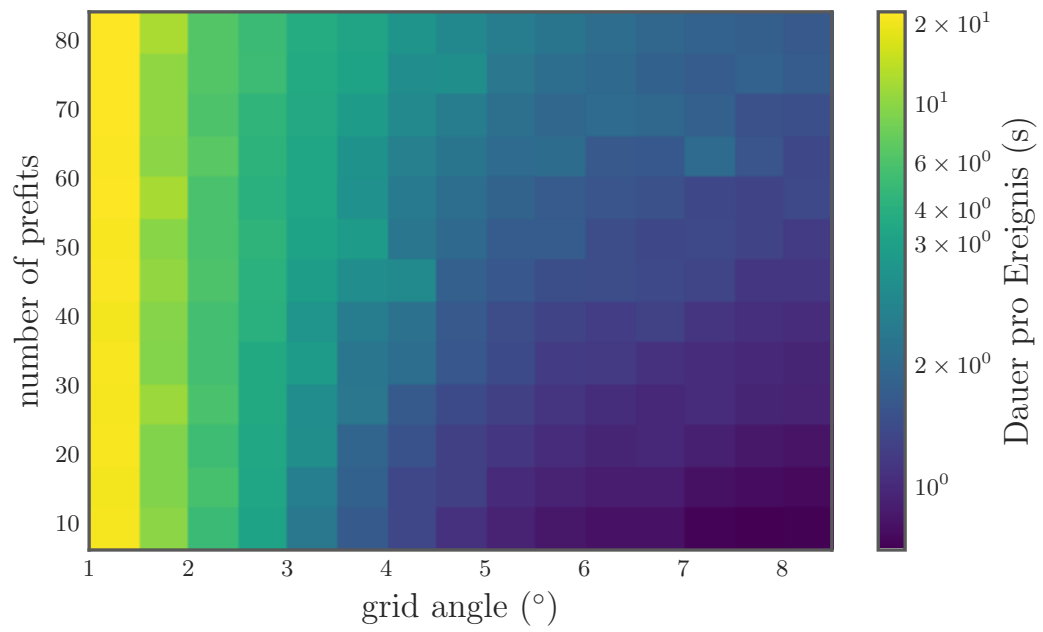


Abbildung 14: Verlauf der Laufzeit in Abhängigkeit des grid angle und der number of prefits.

4.6 Roadwidth bei JPrefit

In der Analyse der *roadwidth* wird zwischen den Programmen JPrefit und JGandalf unterschieden. Als erstes soll JPrefit betrachtet werden. Die *roadwidth* wird wie in Abschnitt 3.3.1 erwähnt, als Ausschlusskriterium dafür verwendet, welche Treffer bei der Rekonstruktion berücksichtigt werden. Abb. 15 zeigt den Verlauf des Öffnungswinkels

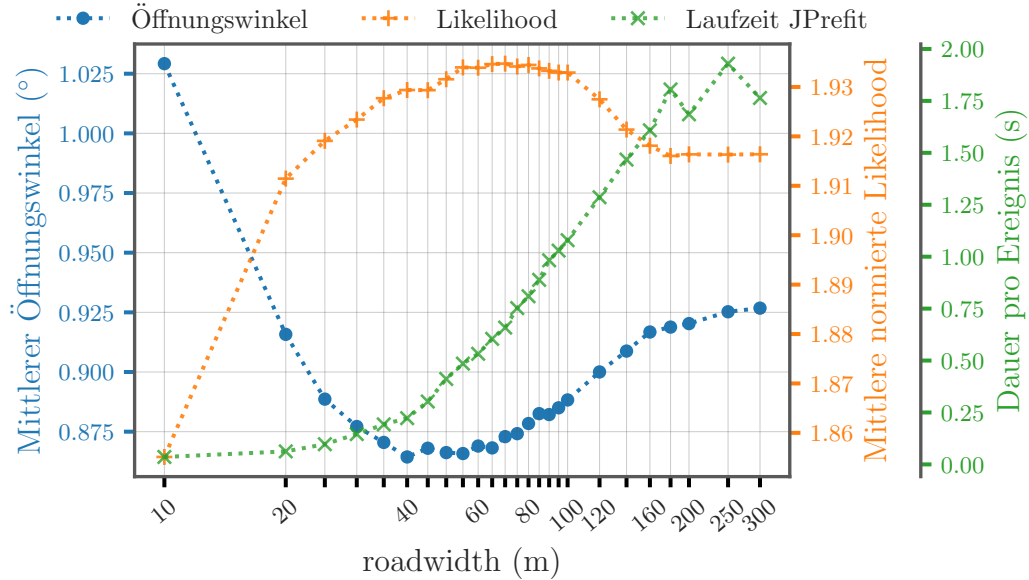


Abbildung 15: Verlauf des Öffnungswinkels und der normierten Likelihood in Abhängigkeit der *roadwidth* bei JPrefit. Dazu die Laufzeit des JPrefit.

winkel und der normierten Likelihood in Abhängigkeit der *roadwidth*. Außerdem ist die Laufzeit des JPrefit aufgetragen. Es ist zu sehen, dass die Leistung mit steigender *roadwidth* erst besser wird, sich bei sehr großen Werten jedoch wieder verschlechtert. Die anfängliche Verbesserung ist auf den Anstieg der zur Verfügung stehenden Daten zurückzuführen. Die Abnahme der Genauigkeit bei großen Werten liegt an der wachsenden Wahrscheinlichkeit Treffer zu verwenden, die nicht zum Ereignis gehören. Diese Treffer können zum Beispiel von ^{40}K Zerfällen entstehen. Es ist weiterhin zu sehen, dass die Likelihood bei einer *roadwidth* über 200 m annähernd gleich bleibt. Bei diesen Werten ist die Größe des Detektors bereits überschritten und es können keine neuen Treffer mehr berücksichtigt werden, wodurch sich auch die Likelihood nicht mehr ändern sollte. Beim Öffnungswinkel kann ein ähnliches Verhalten beobachtet werden. Die Laufzeit steigt mit wachsender *roadwidth* an. Dies ist auch zu erwarten, da eine größere Datenmenge mehr Berechnungen seitens JPrefit mit sich bringt und somit für eine höhere Laufzeit sorgt.

Im Hinblick auf eine Leistungsoptimierung sollte ein Wert zwischen 40 m und 60 m verwendet werden. Für eine laufzeitoptimierte Rekonstruktion sollten möglichst kleine Werte verwendet werden.

4.7 Tmax

Der Parameter *tmax* ist ebenfalls ein Ausschlusskriterium für Treffer. Ein kleinerer Wert sorgt für ein kleineres Zeitfenster für die Aufnahme der Treffer eines Ereignisses. Ein größerer Wert lässt demnach mehr Spielraum für die Korrelation der Treffer. In

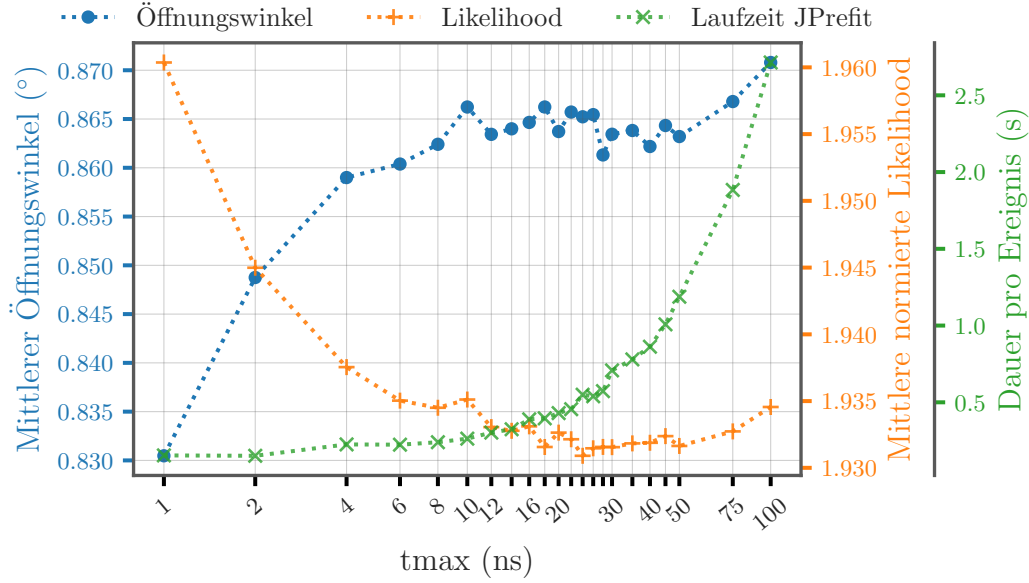


Abbildung 16: Verlauf des Öffnungswinkel und der normierten Likelihood in Abhängigkeit von t_{max} . Dazu die Laufzeit des JPRefit.

Abb. 16 ist der Verlauf des Öffnungswinkel und der normierten Likelihood in Abhängigkeit von t_{max} zu sehen. Außerdem ist die Laufzeit des JPRefit aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich die Präzision bei einer Vergrößerung des Parameters schnell an einen nahezu konstanten Wert bewegt. Eine Verschlechterung der Leistung bei hohen Werten für t_{max} kann dadurch begründet werden, dass nun auch Treffer berücksichtigt werden, die vor bzw. nach dem eigentlichen Ereignis stattfinden. Diese Treffer in der Rekonstruktion zu beachten kann die Leistung verschlechtern. Einen sehr großen Einfluss sieht man bei der Laufzeit von JPRefit. Dieser muss bei zusätzlichen Treffern mehr Berechnungen durchführen und benötigt somit mehr Zeit.

Bei einer laufzeit- bzw. leistungsoptimierten Rekonstruktion sollten möglichst kleine Werte verwendet werden. Allerdings muss beachtet werden, dass die Anzahl der der Ereignisse durch diese Wahl eingeschränkt werden kann.

4.8 Roadwidth bei JGandalf

Weiterhin soll die *roadwidth* des JGandalf betrachtet werden. Abb. 17 zeigt den Verlauf des Öffnungswinkel und der absoluten Likelihood in Abhängigkeit der *roadwidth* von JGandalf. Außerdem ist die Laufzeit von JGandalf aufgetragen. Es wurden nur 100 000 Ereignisse rekonstruiert. Der große Öffnungswinkel bei kleiner *roadwidth* entsteht, da die Ereignisse mit den Anfangsparametern von JPRefit zu stark eingeschränkt sind und somit nicht gut rekonstruiert werden. Mit steigender *roadwidth* kann JGandalf dann bessere Ergebnisse erzielen. Im Gegensatz zum JPRefit nimmt der Öffnungswinkel bei größerer *roadwidth* nicht wieder zu und die Likelihood nicht wieder ab. Dies liegt an Berechnung der Likelihood, da zufällige Treffer in den PMTs durch die Verwendung der PDFs nahezu keinen Beitrag liefern (vgl. Abschnitt 3.3.3).

Es wird außerdem nicht die normierte Likelihood, sondern die absolute Likelihood verwendet. Der Unterschied zwischen diesen beiden Werten ist in Abb. 18 zu sehen. Das Verhalten der normierten Likelihood kann damit begründet werden, dass bei kleiner *roadwidth* nur die Treffer in der Rekonstruktion berücksichtigt werden, die sehr nahe

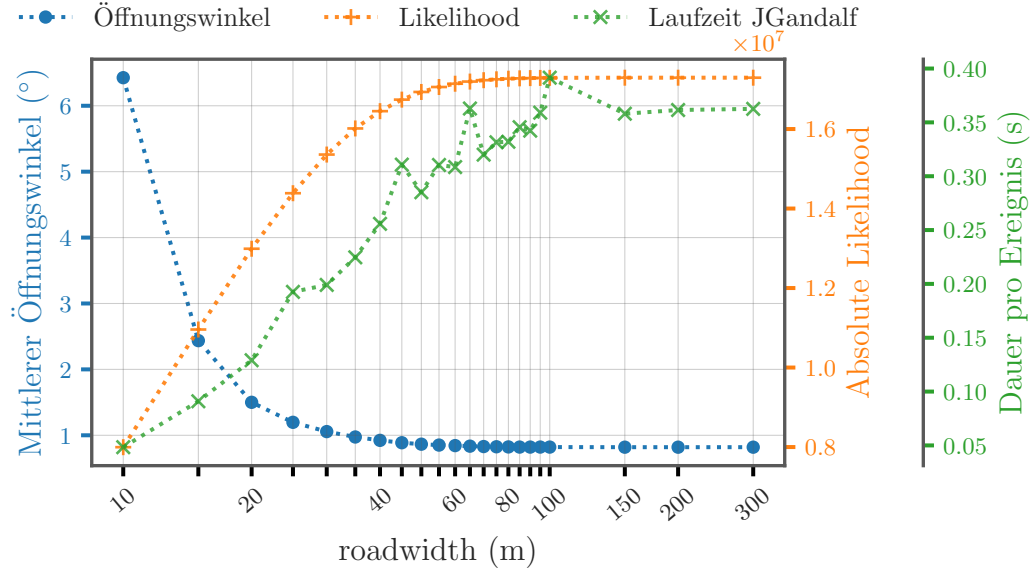


Abbildung 17: Verlauf des Öffnungswinkel und der normierten Likelihood in Abhängigkeit der *roadwidth* bei JGandalf. Dazu die Laufzeit des JGandalf.

an der geschätzten Flugbahn des Teilchen sind. Dadurch wird die berechnete absolute Likelihood nur durch sehr wenige Treffer normiert. Mit steigender *roadwidth* wird der Einfluss von zufälligen Treffern bei der Berechnung der normierten Likelihood immer größer. Dieser Effekt tritt bei der absoluten Likelihood nicht auf, da zufällige Treffer einen sehr geringen Einfluss auf diese haben. Dafür geht aber die gleiche Gewichtung der Ereignisse verloren.

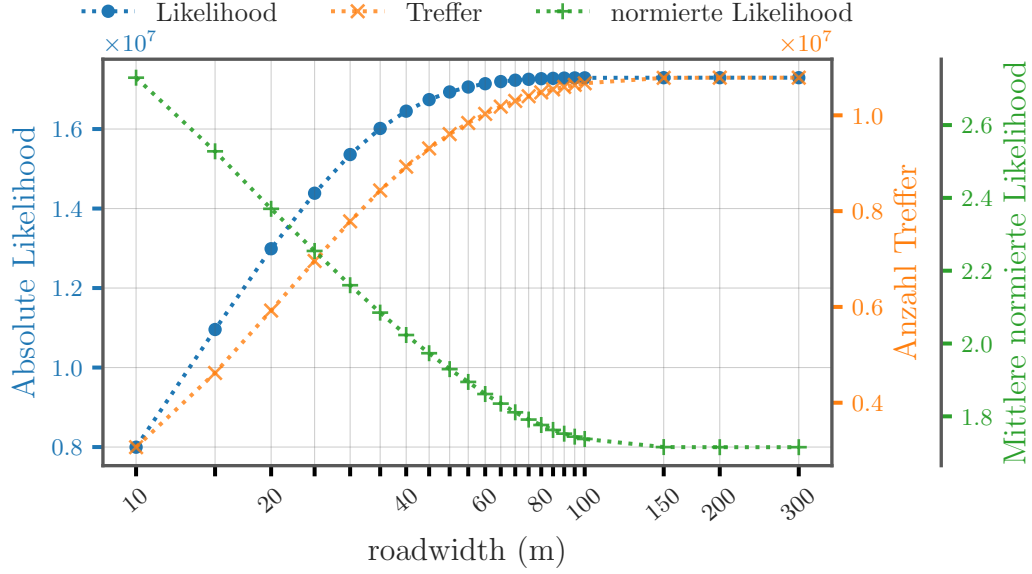


Abbildung 18: Verlauf der absoluten und normierten Likelihood in Abhängigkeit der *roadwidth* bei JGandalf. Außerdem ist die Anzahl der Treffer aufgetragen.

4.9 Transit time spread (TTS)

Der transit time spread ist eine Eigenschaft der PMTs. Dieser gibt die Unsicherheit auf die Zeitinformationen eines Signals an. Mit Hilfe des Parameters *TTS* ist es in JGandalf möglich, die angenommene zeitliche Auflösung der PMTs in den PDFs zu setzen. Dieser Parameter wird nicht primär für eine Leistungs- oder Laufzeitoptimierung untersucht, sondern im Hinblick auf einen unpräzise kalibrierten Detektor. Der Effekt dieses Parameters auf den Öffnungswinkel und die normierte Likelihood ist in Abb. 19 zu sehen. Außerdem ist die Gesamtlaufzeit der Rekonstruktionskette zu sehen. Es ist ein Minimum des Öffnungswinkel bei 2 ns zu sehen. Dieser Wert wird auch verwendet, um die MC-Daten zu erstellen. Die normierte Likelihood hat ihr Maximum allerdings bei einem etwas größeren Wert ($\approx 2,2$ ns). Eine Ursache dafür konnte nicht ermittelt werden. Da die *TTS* die zeitliche Auflösung der PMTs in der PDF verändert, wächst die Gewichtung von Treffern, die nicht zum Ereignis gehören mit größeren Werten. Die Änderung der Laufzeit ist im Vergleich zu den vorherigen Analysen sehr gering. Für die Rekonstruktion sollte die bekannte *TTS* der PMTs genutzt werden.

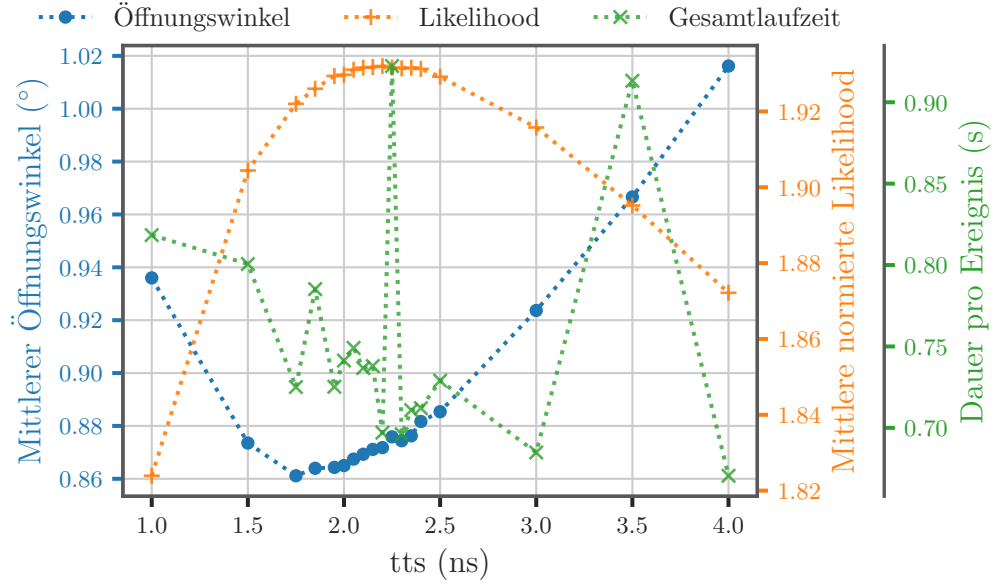


Abbildung 19: Verlauf des Öffnungswinkel und der normierten Likelihood in Abhängigkeit der TTS . Dazu die Gesamtlaufzeit der Rekonstruktionskette.

4.10 TTS mit verändertem Detektor

Darüber hinaus soll überprüft werden, ob durch einen größeren Wert für den TTS ein ungenau kalibrierter Detektor bessere Ergebnisse liefert. Dazu wird der ORCA7 Detektor um 5 % gestreckt. Abb. 20 zeigt den Verlauf des Öffnungswinkel und der normierten Likelihood in Abhängigkeit der TTS bei Verwendung des gestreckten Detektors. Außerdem ist die Gesamtlaufzeit der Rekonstruktionskette zu sehen. Die beste Genauigkeit wird nun bei 3 ns erreicht. Außerdem liegen die Optima von Likelihood und Öffnungswinkel besser übereinander.

Aus dieser Analyse geht zum Einen hervor, dass sich die Leistung der Rekonstruktion mit einem ungenau kalibrierten Detektor drastisch verschlechtert, zum Anderen kann die Genauigkeit durch eine höhere Wahl des TTS wieder verbessert werden.

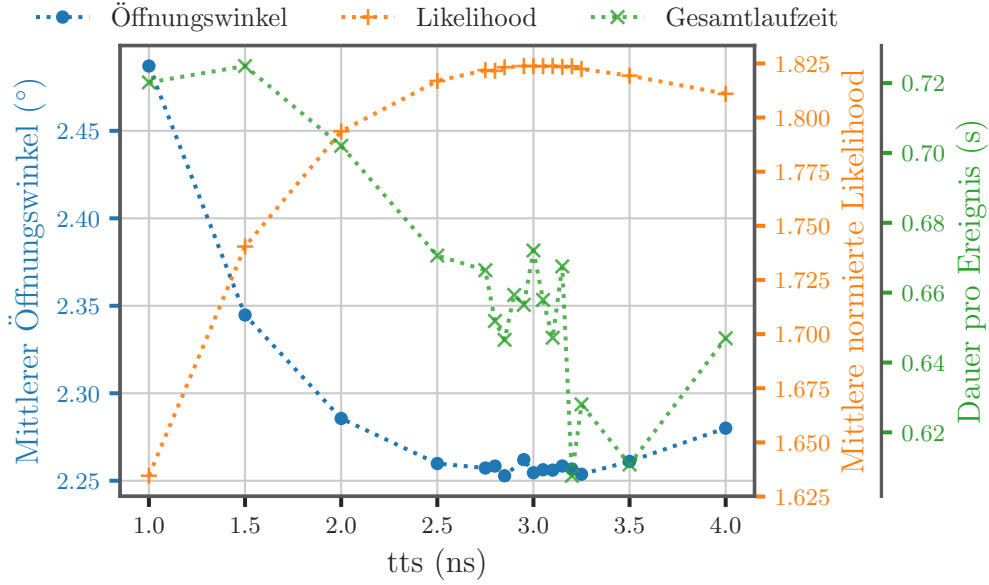


Abbildung 20: Verlauf des Öffnungswinkel und normierten Likelihood in Abhängigkeit der TTS . Dazu die Gesamtlaufzeit der Rekonstruktionskette. Für die Rekonstruktion wird ein um 5 % gestreckter Detektor verwendet.

4.11 Vergleich mit Realdaten

Bisher wurde die Analyse der Laufzeit und Genauigkeit der Rekonstruktionskette für Myon MC-Daten gezeigt. Nun werden die Resultate mit echten Daten verglichen. Die verwendeten Daten stammen von vier DUs, die in zwei Zweierreihen angeordnet sind. Es soll überprüft werden, ob die Erkenntnisse aus den MC-Daten auch für Realdaten gelten. Beispielhaft soll die Analyse der Parameter *grid angle* und *number of prefits* mit Realdaten gezeigt werden. Es werden 100 000 Ereignisse rekonstruiert. Die Ereignisse müssen mindestens zehn DOMs treffen, um in der Analyse berücksichtigt zu werden.

Der Verlauf der normierten Likelihood in Abhängigkeit des *grid angle* und der *number of prefits* ist in Abb. 21 zu sehen. Es fällt auf, dass im Vergleich zu Abb. 13 höhere Werte für die normierte Likelihood entstehen. Dies ist ein bekannter Effekt, der innerhalb der Kollaboration bereits untersucht wird. Außerdem ist das Maximum zu etwas größeren *grid angle* ($3,5^\circ$) verschoben, da ein anderer Detektor verwendet wird.

Aus dem Vergleich kann man sehen, dass sich die Genauigkeit in Abhängigkeit der Parameter bei Verwendung von Realdaten sehr ähnlich Verhält, wie bei den Myon MC-Daten. Somit können die Aussagen über Myon MC-Daten direkt auf Realdaten übertragen werden.

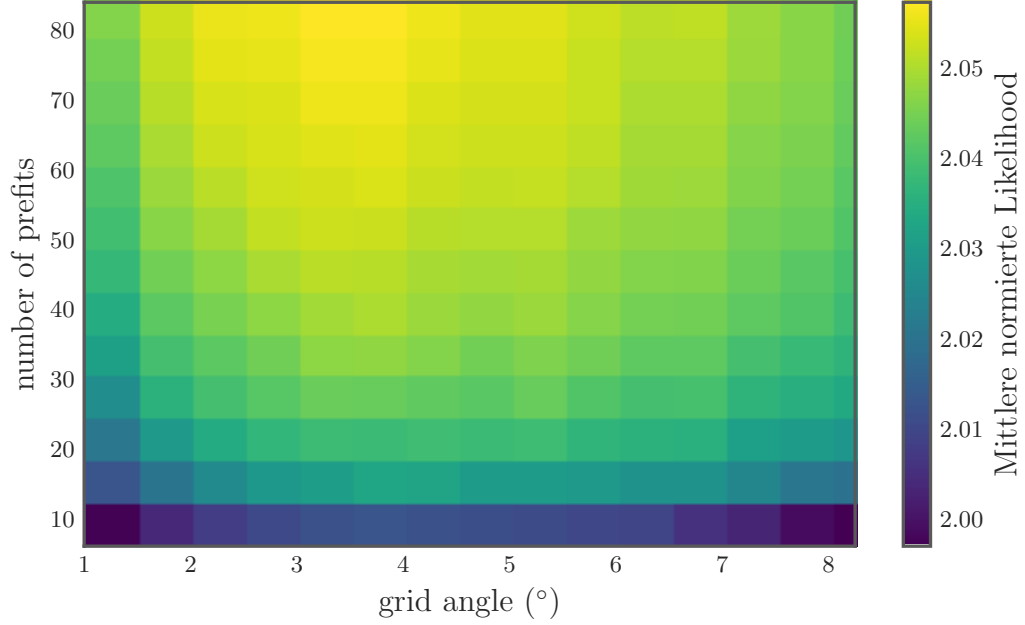


Abbildung 21: Verlauf der normierten Likelihood in Abhängigkeit von *grid angle* und *number of prefits*. Für die Rekonstruktion werden Realdaten verwendet.

4.12 Finale Rekonstruktionsparametersätze

Mittels der Ergebnisse der Analyse der Parameter, sollen nun Parametersätze für eine spätere Untersuchung erstellt werden. Es wird von den Standardparametern ausgegangen, um sowohl leistungs- als auch laufzeitorientierte Parametersätze zu generieren. Dabei ist zu beachten, dass die Analyse der einzelnen Parameter für Myonendaten durchgeführt wurden. Für Neutrinodaten sind also möglicherweise andere Sätze besser geeignet. Für den Vergleich werden Myon MC-Daten des ORCA7 Detektors verwendet. Es werden insgesamt 200 000 Ereignisse pro Parametersatz rekonstruiert.

Die gewählten Parametersätze sind in Abb. 22 mit ihren mittleren Öffnungswinkeln und normierten Likelihoods zu sehen. Außerdem ist die Gesamtlaufzeit der Rekonstruktion zu sehen. Die Parametersätze sind nach dem Öffnungswinkel sortiert. Es wurden nur die Parameter *grid angle* (im Bild mit „a“ abgekürzt), *number of prefits* („p“), *tmax* („t“) und die *roadwidth* („r“) bei JPrefit verändert. Im Hinblick auf die folgende Kalibrierung mit atmosphärischen Myonen wird die *roadwidth* bei JGandalf unter den Sätzen nicht variiert, da diese einen zu großen Einfluss auf die normierte Likelihood hat (siehe Abschnitt 4.8) und dadurch die Ergebnisse nicht mehr vergleichbar sind. Auch der Parameter *TTS* bleibt bei 2 ns.

Anhand der Parametersätze in Abb. 22 ist bereits zu sehen, dass die Laufzeit stark verringert werden kann, wenn ein geringer Verlust der Genauigkeit in Kauf genommen wird. So kann die Laufzeit um 30 % gesenkt werden, wenn der Parametersatz ($a=4^\circ$, $p=24$, $r=40$ m, $t=14$ ns) verwendet wird. Die Genauigkeit sinkt dabei nur um $0,004^\circ$. Eine Laufzeitreduktion um fast 50 % mit einer Verschlechterung der Genauigkeit um $0,016^\circ$ ist mit dem Parametersatz ($a=6^\circ$, $p=30$, $r=35$ m, $t=12$ ns) möglich.

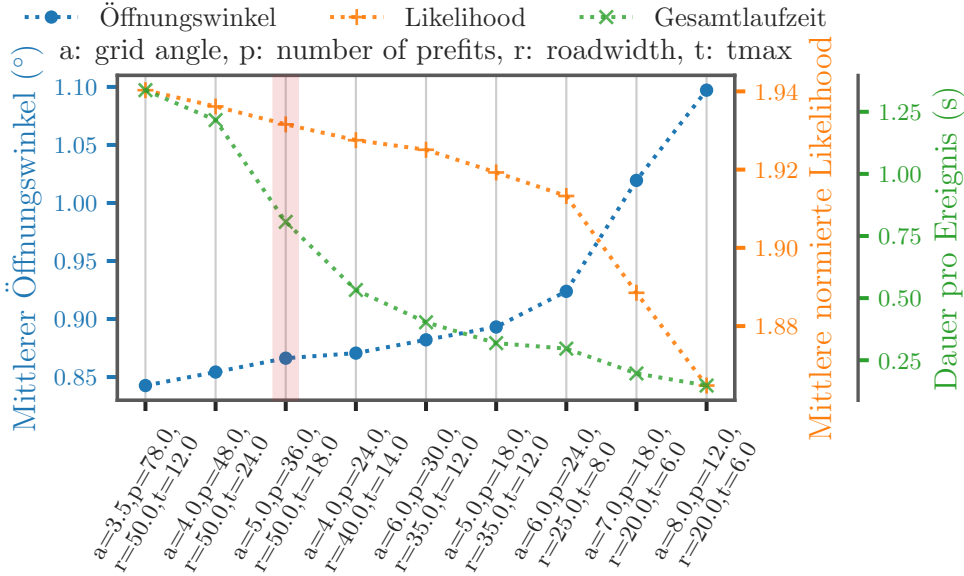


Abbildung 22: Verlauf des Öffnungswinkel und normierten Likelihood der später verwendeten Parametersätze. Dazu ist die Gesamtlaufzeit aufgetragen. Der Standardparametersatz ist in rot markiert.

4.13 Einfluss von JSimplex auf die Rekonstruktion

Bislang wurde immer die Standardrekonstruktionskette verwendet. Nun soll der Einfluss des Programms JSimplex auf die Rekonstruktionskette untersucht werden. Dieses wird zwischen JPrefit und JGandalf ausgeführt und soll primär die Präzision erhöhen. Die Auswirkung wird nur an den Standardparametern demonstriert. Abb. 23 zeigt die Verteilung der Winkel zwischen der rekonstruierten und der wahren Flugbahn. Es ist zu erkennen, dass die Präzision durch Verwendung von JSimplex leicht verbessert wird. Auch das Nebenmaximum bei $\approx 90^\circ$ ist schwächer ausgeprägt, was für eine bessere Rekonstruktion spricht. Ein Vergleich zwischen den Median Werten zeigt eine Verbesserung von etwa $0,026^\circ$. Gleichzeitig verringert sich die Laufzeit um fast 20%. Die Verbesserung der Laufzeit ist damit zu begründen, dass JSimplex die von JPrefit ausgegebenen Flugbahnen nun unter Berücksichtigung von allen fünf Variablen behandelt. Dadurch werden die Spuren für JGandalf näher an das Optimum gebracht und es müssen signifikant weniger Iterationen in JGandalf durchgeführt werden, um das Optimum zu finden. Dadurch wird es auch unwahrscheinlicher nur ein lokales Optimum zu finden. Dies erklärt ebenfalls die Verbesserung der Genauigkeit. In Abb. 24 ist die Verteilung der normierten Likelihood gezeigt. Auch hier ist eine Verbesserung von $\approx 1\%$ zu erkennen.

Mit diesem Wissen werden die in Abschnitt 4.12 definierten Parametersätze nun nochmals mit Verwendung von JSimplex untersucht. Der Verlauf des Öffnungswinkel und der normierten Likelihood ist in Abb. 25 zu sehen. Außerdem ist die Gesamtlaufzeit der Parametersätze gezeigt. Die Parametersätze sind in der selben Reihenfolge sortiert wie in Abb. 22. Ein Vergleich mit dem dort dargestellten Verlauf zeigt eine allgemeine Verbesserung der Laufzeit. Allerdings fällt auf, dass der Öffnungswinkel und normierte Likelihood der Parametersätze nicht gleichmäßig verbessert wird. Die Verbesserung scheint von der *number of prefits* abzuhängen, da Parametersätze mit größerer *number of prefits* mehr verbessert werden. Außerdem ist die Verbesserung der Leistung beson-

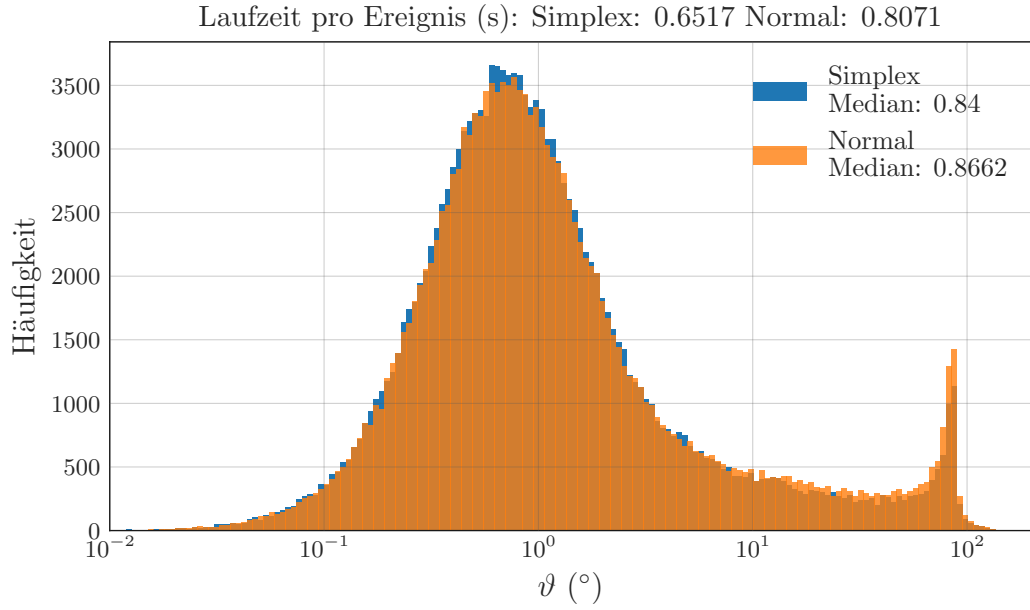


Abbildung 23: Verteilung des Winkels zwischen rekonstruierter und wahrer Flugbahn mit Verwendung von JSimplex und der Standardrekonstruktionskette. Außerdem ist die Gesamtlaufzeit angegeben.

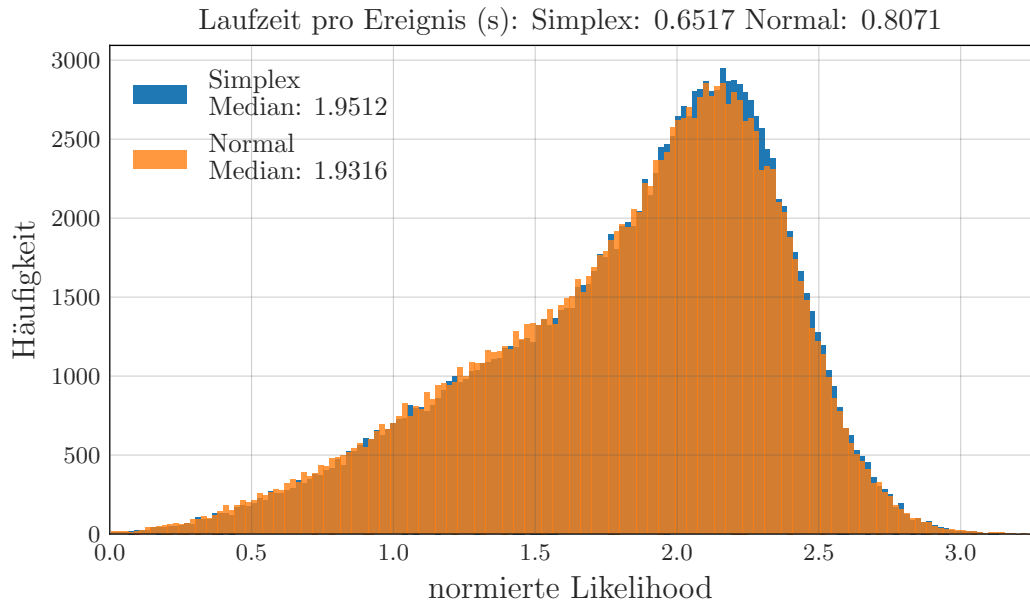


Abbildung 24: Verteilung der normierten Likelihood mit und ohne Verwendung von JSimplex. Außerdem ist die Gesamtlaufzeit der Rekonstruktionskette angegeben.

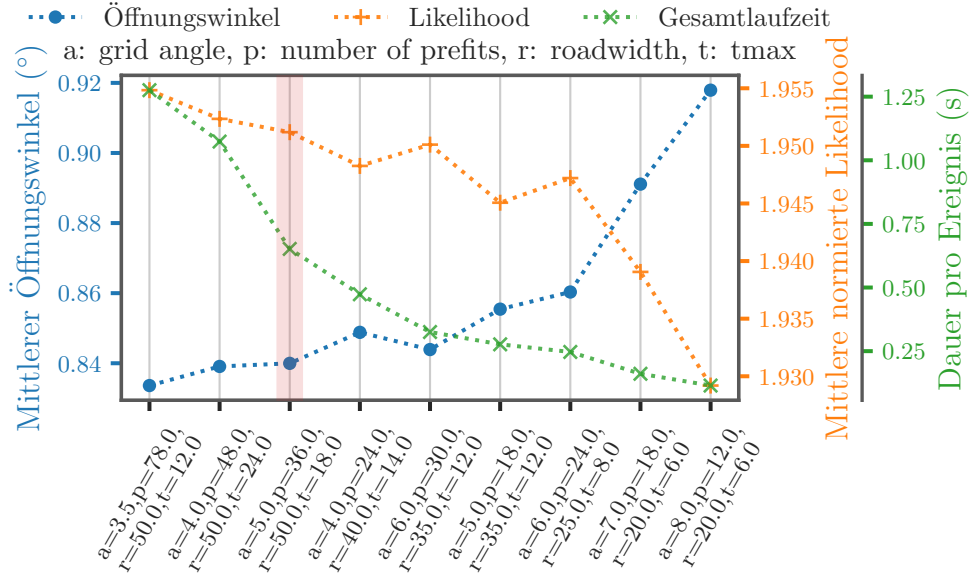


Abbildung 25: Verlauf des Öffnungswinkel und normierten Likelihood der untersuchten Parametersätze mit Verwendung von JSimplex. Dazu ist die Gesamtlaufzeit der Rekonstruktionkette aufgetragen. Der Standardparametersatz ist in rot markiert.

ders bei den ungenaueren Parametersätzen zu sehen. Da die Laufzeit des JSimplex sehr gering ist, wäre es für weitere Studien interessant, eine große *number of prefits* in JSimplex zu geben, anschließend aber bei JGandalf nur eine geringe Anzahl von Spuren zu verwenden. Dies könnte die Gesamtlaufzeit weiter verbessern.

5 Optimierung der auf atmosphärischen Myonen basierenden Kalibrierung

Die Grundzüge der Kalibrierung mit atmosphärischen Myonen sind bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben. In diesem Kapitel soll nun die Methode im Detail beschrieben werden. Anschließend werden die Auswirkungen der verschiedenen Parametersätze gezeigt.

Die Kalibrierung nutzt das Signal von atmosphärischen Myonen, welches kontinuierlich aufgenommen wird. Die Qualität der Rekonstruktion dieser Flugbahnen ist in den vorherigen Kapiteln gezeigt. Bei der Kalibration wird eine möglichst genaue Detektorgeometrie gesucht. Dazu müssen viele Rekonstruktionen durchgeführt werden. Eine Optimierung der Laufzeit der Rekonstruktionskette ist also wünschenswert.

5.1 Funktionsweise der Methode

Das Ziel ist es, für eine DU einen Parameter zu ermitteln, der besagt um welchen Wert die Geometrie verändert werden muss. Dafür wird ein Satz an Detektorgeometrien erstellt, welche sich nur in der jeweiligen Eigenschaft der DU unterscheiden. Für jede dieser Geometrien wird die Rekonstruktion der Daten durchgeführt. Anschließend werden Filter wie die Anzahl der getroffenen DOMs angewandt und die Likelihood für jede Detektorgeometrie wird bestimmt. Ein Beispiel für das Endergebnis einer Kalibra-

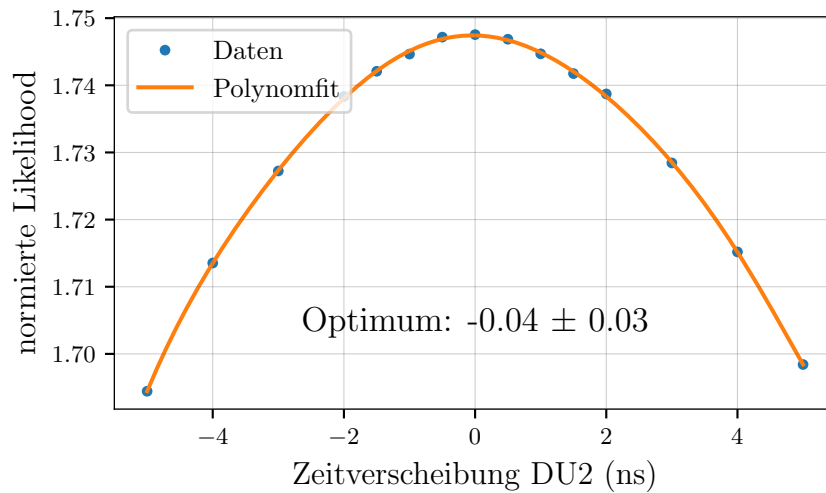


Abbildung 26: Verlauf der normierten Likelihood für die verschiedenen Zeitverschiebungen der Detektionseinheit 2(DU2). Für die Rekonstruktion wurden Myon MC-Daten und Standardparameter verwendet.

tion ist in Abb. 26 zu sehen. In diesem Beispiel wurden Myon MC-Daten verwendet. Die Rekonstruktion erfolgt mit Standardparametern. Bei der Kalibration werden die Daten für verschiedene Zeitverschiebungen der DU2 rekonstruiert. Am Ende der Rekonstruktion wird die normierte Likelihood für jede Zeitverschiebung berechnet. Um das Maximum der Kurve auszulesen, welches der optimalen Geometrie entspricht, wird ein hochgradiges Polynom an die Daten gefittet. Für die Berechnung der Unsicherheit auf das Optimum werden die rekonstruierten Ereignisse in Blöcke unterteilt (3000 Ereignisse pro Block). Für jeden einzelnen Block wird dann die optimale Zeitverschiebung gesucht. In Abb. 27 ist die Häufigkeitsverteilung der optimalen Zeitverschiebung

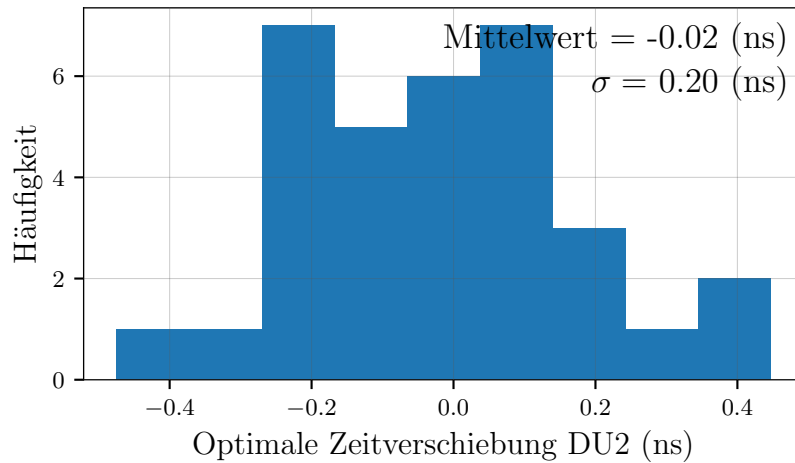


Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung der optimalen Zeitverschiebungen für die DU2.

dargestellt. Aus dieser Verteilung wird nun die Standardabweichung berechnet. Durch Division mit der Wurzel der Einträge in der Verteilung erhält man eine Abschätzung über die Unsicherheit auf die optimale Zeitverschiebung der gesamten Daten. Das Beispiel zeigt einen korrekt Kalibrierten Detektor (ORCA7). Daher liegt das Optimum bei Null. Bei Realdaten und einem weniger gut kalibrierten Detektor muss die aktuelle Geometrie durch die Position des Optimums korrigiert werden. Durch Iterieren dieser Kalibrierungsmethode ist möglich die genannten Dimensionen des Detektors (Position, Drehwinkel und Streckung jeder DU) zu bestimmen. Daraus geht hervor, dass eine genaue Kalibrierung auch mit einem großen Zeit- und Rechenaufwand verbunden ist. Es ist auch möglich, einzelne DOMs innerhalb einer DU zu behandeln. Der Zeitaufwand ist dementsprechend groß, sollten alle DOMs einzeln analysiert werden.

5.2 Vergleich der Leistung verschiedener Parametersätze

In diesem Kapitel werden die in Abschnitt 4.12 gezeigten Parametersätze in der Kalibrierung verwendet. Dabei wird die Laufzeit und die Leistung der Kalibrierung überwacht. Es werden Myon MC-Daten des ORCA7 Detektors verwendet. Als Beispiel dient eine Kalibration der Zeitverschiebung und der Rotation von DU2. Die Optima schwanken um Null. Um die Qualität der Parametersätze zu quantifizieren wird die oben beschriebene Unsicherheit auf das Optimum bei der Kalibrierung verwendet.

5.2.1 Zeitliche Kalibrierung

Abb. 28 zeigt den Verlauf der Unsicherheit auf das Optimum bei einer Kalibration der zeitlichen Verschiebung von DU2. Außerdem ist die Laufzeit der Parametersätze aufgetragen. Es wird JSimplex zwischen JPrefit und JGandalf verwendet. Die Parametersätze sind so wie in Abb. 25 sortiert. Der Verlauf der Unsicherheit zeigt den Trend, dass genauere Parametersätze zu einer geringeren Unsicherheit auf das Optimum führen. Eine exakte Übereinstimmung des Verlaufs mit Abb. 25 ist nicht gegeben. Auch die Laufzeit zeigt ein sehr ähnliches Verhalten.

Aus diesen Ergebnissen kann somit geschlossen werden, dass die Erkenntnisse von Abschnitt 4 auf die zeitliche Kalibrierung übertragen werden können.

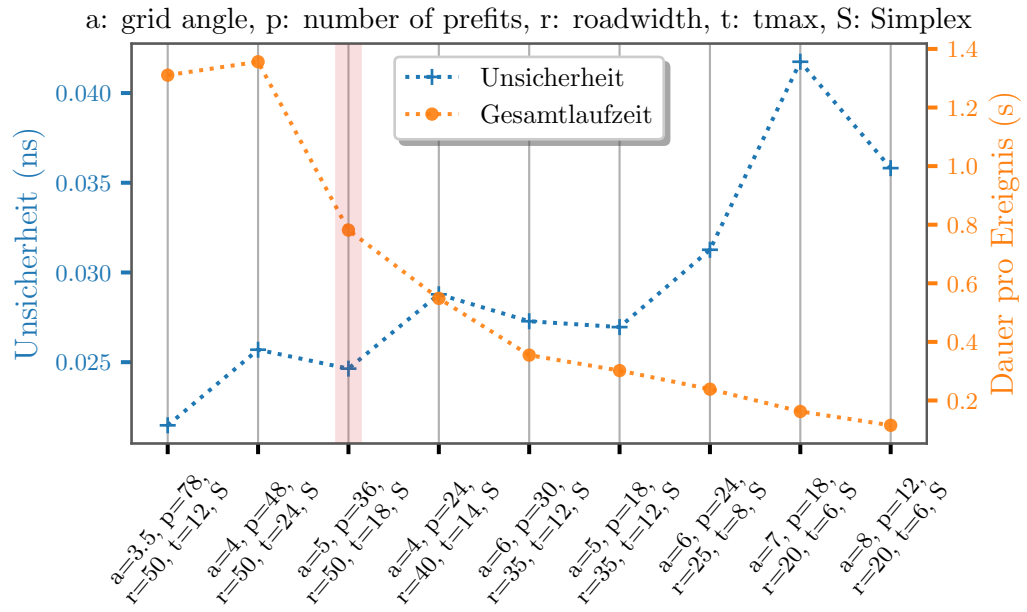


Abbildung 28: Unsicherheit und Laufzeit der bei der zeitlichen Kalibration von DU2 verwendeten Parametersätze.

5.2.2 Rotationskalibrierung

Neben der zeitlichen Kalibrierung der DU2 wird außerdem noch die Rotation untersucht. Für den Fit an die normierte Likelihood (vgl. Abb. 26) wird nun eine Funktion der Form

$$f(x) = f_0 + A \cdot \cos(\gamma x + \phi) \quad (5.1)$$

verwendet. Diese beschreibt das Verhalten einer DU unter Drehung. Ein Beispiel für eine Rotationskalibrierung ist in Abb. 29 zu sehen. Der Verlauf der Unsicherheit und Laufzeit der Parametersätze ist in Abb. 30 gezeigt. Es wird JSimplex verwendet. Im Vergleich zur zeitlichen Kalibrierung kann bei der Rotationskalibrierung einer DU keine Korrelation zwischen der Unsicherheit des Optimums und der Genauigkeit des Parametersatzes festgestellt werden. Die Größe der Blöcke wird auf 5000 Ereignisse erhöht, um eventuelles Rauschen zu eliminieren. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Kalibrierung der Rotation nur zu einem geringen Maß von der Genauigkeit des Parametersatzes abhängt. Der Verlauf der Laufzeit der Parametersätze stimmt mit den vorherigen überein.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Laufzeit der Rekonstruktion durch die Wahl eines Parametersatzes mit geringerer Laufzeit mit Einbußen in der Unsicherheit auf das Ergebnis gesenkt werden kann. Im Falle einer Rotationsrekonstruktion ist die Unsicherheit im Verhältnis sehr gering, sodass eine aggressivere Laufzeitoptimierung gewählt werden kann.

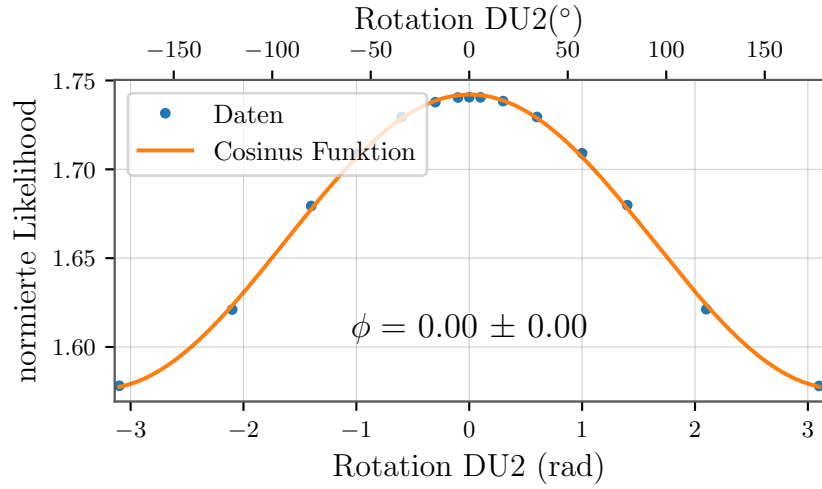


Abbildung 29: Verlauf der normierten Likelihood für die verschiedenen Rotationen vom DU2. Für die Rekonstruktion wurden Myon MC-Daten, Standardparameter und JSimplex verwendet.

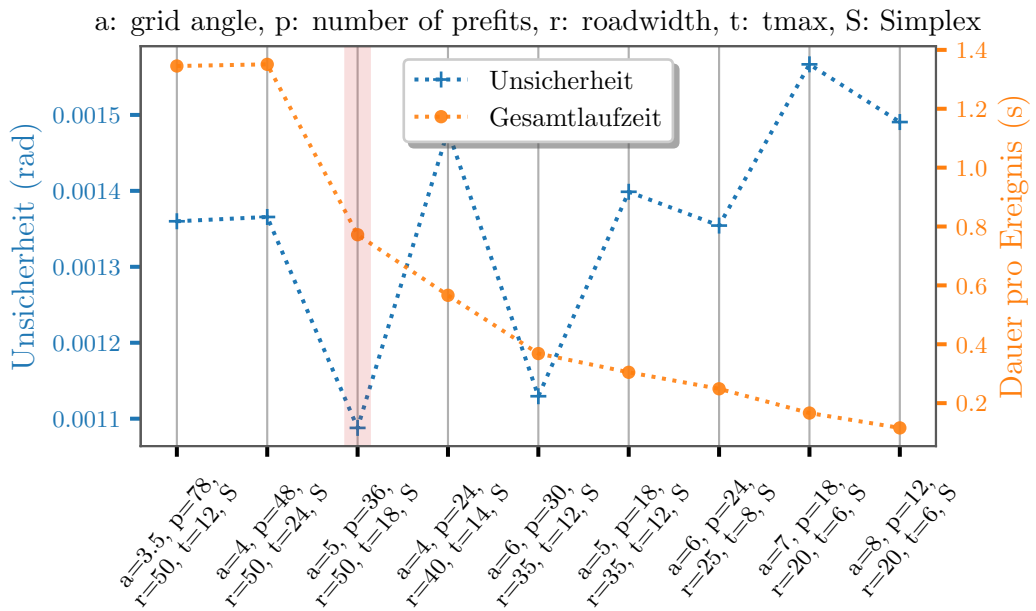


Abbildung 30: Unsicherheit und Laufzeit der bei der Rotationskalibration verwendeten Parametersätze.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Bachelorarbeit wurde die Myon Rekonstruktion bei KM3NeT ORCA im Hinblick auf die Detektorkalibrierung mit atmosphärischen Myonen untersucht.

Der erste Teil dieser Arbeit behandelt die Rekonstruktion von Myonen bei KM3NeT ORCA. Dabei wurde die Rekonstruktion beschrieben und die Funktionen der dabei verwendeten Programme „JPrefit“, „JSimplex“ und „JGandalf“ erläutert. Anschließend wurden die Rekonstruktionsparameter von JPrefit und JGandalf mit Myon Monte-Carlo Daten des ORCA7 Detektors analysiert und ein Vergleich zu echten Daten des viersträngigen ORCA Detektors gezogen. Danach wurden Rekonstruktionsparametersätze erstellt, deren Genauigkeit und Laufzeit ermittelt wurden. Am Ende dieses Teils wurden die Auswirkungen des Programms JSimplex auf die Rekonstruktionsskette gezeigt und die Parametersätze erneut untersucht.

Mit Hilfe der Analysen der Rekonstruktionsparameter und bei Verwendung von JSimplex konnten Parametersätze gefunden werden, die die Laufzeit der Rekonstruktionsskette um bis zu 50 % reduzieren und dabei nur eine geringe Abnahme der Genauigkeit mit sich bringen. Der Parametersatz ($a=6^\circ$, $p=30$, $r=35$ m, $t=12$ ns) bietet die genannte Laufzeitveringerung mit einem mittleren Öffnungswinkel von $0,844^\circ$. Aus den Analysen der einzelnen Parameter können aber je nach Verwendungszweck neue Parametersätze gebildet werden.

Der zweite Teil der Arbeit behandelt die Kalibrierung des Detektors mit atmosphärischen Myonen. Dafür wurde zunächst die Methode erläutert und anhand eines Beispiels vorgestellt. Abschließend wurden die Auswirkungen der im ersten Teil erhobenen Parametersätze auf die Methode dargestellt. Dazu wurden beispielhaft eine zeitliche Kalibration und Rotationskalibrierung der Detektionseinheit 2 des ORCA7 Detektors gezeigt.

Auch hier ging hervor, dass die Laufzeit der zeitlichen Kalibrierung stark gesenkt werden kann ($\approx 50\%$), wenn eine Vergrößerung der Unsicherheit der Kalibration in Kauf genommen wird. Die Rotationskalibrierung erwies sich als deutlich resistenter gegenüber ungenaueren Parametersätzen, sodass hier eine nochmals stärkere Optimierung der Laufzeit möglich ist.

Diese Arbeit hat sich auf die Kalibrierung von Detektionseinheiten im Detektor beschränkt. Für nachfolgende Studien bleibt zum Beispiel die Kalibrierung der Digitalen optischen Module innerhalb einer Detektionseinheit. Weiterhin verfügt das Programm JSimplex über einige Parameter, die in dieser Arbeit nicht behandelt wurden. Neben JSimplex gibt es aber auch noch weitere Programme, die in der Rekonstruktion verwendet werden können und neue Rekonstruktionsparameter mit sich bringen.

Abschließend ist zu beachten, dass die Erkenntnisse dieser Arbeit auf der Rekonstruktion von Myonen beruhen. Für die Rekonstruktion von Neutrinos können sich andere Anforderungen ergeben. In einem ersten Vergleich mit Neutrino Monte-Carlo Daten konnte aber ein qualitativer Zusammenhang festgestellt werden.

Literatur

- [1] S. Abe u. a. „Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND“. In: *Phys. Rev. Lett.* 100 (22 2008), S. 221803. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.221803. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.221803>.
- [2] S Adrián-Martínez u. a. „Letter of intent for KM3NeT 2.0“. In: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 43.8 (Juni 2016), S. 084001. ISSN: 1361-6471. DOI: 10.1088/0954-3899/43/8/084001. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/43/8/084001>.
- [3] A. V. Akindinov u. a. „Letter of interest for a neutrino beam from Protvino to KM3NeT/ORCA“. In: *The European Physical Journal C* 79.9 (2019), S. 758. ISSN: 1434-6052. DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-7259-5. URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7259-5>.
- [4] Internetchemie ChemLin. *Brechungsindex von Wasser*. Besucht am 25.09.2019. Jan. 2019. URL: <https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/b/brechungsindex%20wasser.php>.
- [5] Lew Classen. „The mDOM– a multi-PMT digital optical module for the IceCube-Gen2 neutrino telescope“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017. URL: https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/physik_kp/agkappes/abschlussarbeiten/doktorarbeiten/1702-phd_lclassen.pdf.
- [6] A. Enzenhöfer u. a. „Deep sea tests of a prototype of the KM3NeT digital optical module: KM3NeT Collaboration“. In: *European Physical Journal C* 74 (9). DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-3056-3.
- [7] C. Grupen. *Astroparticle Physics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2010. ISBN: 978-3-540-25312-9.
- [8] mdejong. *JGandalf.cc File Reference*. URL: https://www.nikhef.nl/~kmelis/Jpp/html/JGandalf_8cc.html.
- [9] mdejong. *JPrefit.cc File Reference*. URL: https://www.nikhef.nl/~kmelis/Jpp/html/JPrefit_8cc.html.
- [10] mdejong. *JSimplex.cc File Reference*. URL: https://www.nikhef.nl/~kmelis/Jpp/html/JSimplex_8cc.html.

Danksagung

Am Ende meiner Bachelorarbeit möchte ich die Gelegenheit nutzen und meinen Dank aussprechen.

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Kappes für die Möglichkeit, diese Arbeit in seiner Arbeitsgruppe anzufertigen, bedanken. Außerdem gilt mein Dank Prof. Klein-Bösing für die Zweitkorrektur dieser Arbeit.

Ganz besonders danke ich Daniel für die wunderbare Betreuung und Unterstützung während meiner Zeit hier, dafür dass er meine Fragen und Probleme immer geschickt lösen konnte und für die kleinen Späße zwischendurch.

An den Rest in der Arbeitsgruppe kann ich nur sagen, dass es mir viel Freude bereitet hat, mit euch zu Arbeiten. Ich habe mich vom ersten Tag an gut aufgenommen gefühlt und die Zeit wirklich genossen.

Als letztes möchte ich meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung nicht nur während der letzten Monate, sondern auch meiner Studienzeit danken.



Plagiatserklärung

Hiermit versichere Ich, dass die vorliegende Arbeit über „Studien zur Myon Rekonstruktion bei KM3NeT ORCA im Hinblick auf die Optimierung der Detektorkalibrierung mit atmosphärischen Myonen“ selbstständig 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 entnommenen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

(Datum, Unterschrift)

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 eine Datenbank einverstanden.

(Datum, Unterschrift)