

Untersuchungen zur Korrelation von optischen und akustischen Signalen am ANTARES Neutrino-Teleskop

Bachelorarbeit

vorgelegt von
Sebastian Schmidt

Erlangen Centre for Astroparticle Physics
Physikalisches Institut I
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

1. Gutachter: PD Dr. Robert Lahmann
2. Gutachter: Dr. Thomas Eberl

Tag der Abgabe: 11. August 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Vorwort	5
2 Neutrinodetektion und Detektoraufbau	7
2.1 Akustische Neutrinodetektion	7
2.2 ANTARES und AMADEUS	9
3 Messdaten	11
3.1 Eigenschaften	11
3.1.1 Optische Daten	11
3.1.2 Akustische Daten	11
3.2 Reduktion	14
3.2.1 Aktivität der Lines	14
3.2.2 Abstand	14
3.2.3 Definition eines Events	19
3.2.4 Klassifikation von Neutrino-Kandidaten	19
3.2.5 Fehler des Verfahrens und dessen Einschränkung	24
4 Statistische Auswertung	27
4.1 Signal - Abschätzung des Zeitfensters	27
4.2 Untergrund	30
4.2.1 Betrachteter Zeitraum - ROI	30
4.2.2 Test auf Poissonverteilung	30
5 Wahrscheinlichkeit, Untergrund zu messen	35
5.1 Wahrscheinlichkeit pro Run	35
5.1.1 Über Poissonverteilung	35
5.1.2 Über direkte Wahrscheinlichkeit	36
5.2 Für alle Runs	37
6 Auswertung	39
6.1 Zufallserzeugte Daten	39
6.2 Messdaten	42
6.2.1 Korrelation akustischer und optischer Daten	42
6.2.2 Erweiterte Untersuchungen	44
6.2.3 Rekonstruktion	45
6.3 Sparking Event	46
7 Zusammenfassung	51
A Daten der optischen Events	53

Neutrinos sind allgegenwärtig. Hochenergetische Vertreter können zum einen in der Atmosphäre aus dem Zerfall von Kaonen und Pionen, die aus Prozessen mit Gamma- oder kosmischer Strahlung stammen, aber auch bei einer Vielzahl von astrophysikalischen Prozessen entstehen. Dort treten diese als Zweitprodukt aus der Interaktion kosmischer Strahlung mit Photonen der kosmischen Untergrundstrahlung auf. Sie erreichen Energien von über 10^{18} eV und werden deshalb als sog. *Ultra High Energy* (UHE) Neutrinos bezeichnet [1].

Dies ist für die Erforschung des Weltalls sehr interessant. Anders als kosmische Strahlung, bestehend aus geladenen Teilchen, die durch magnetische Felder abgelenkt wird oder Photonen, die absorbiert werden, wandern die von einer Quelle ausgesandten Neutrinos entlang einer virtuellen Linie, sodass damit theoretisch ihr Ausgangspunkt bestimmt werden kann.

Obwohl der die Erde erreichende Neutrinostrahlung sehr groß ist, ist der Nachweis einzelner Teilchen nicht einfach. Diese reagieren stets über die schwache Wechselwirkung, weshalb die Wirkungsquerschnitte klein und die Neutrinos damit nur sehr schwer zu detektieren sind. Große Detektoren sind die notwendige Folge und führten unter anderem zum Bau von ANTARES.

Bei diesem Detektor erfolgt die Messung über Photomultiplier. Aus einer Reaktion eines Neutrinos mit Wassermolekülen entstehen geladene Sekundärteilchen. Bewegen sich diese schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Wasser, erzeugen sie Tscherenkov-Licht, das anschließend detektiert werden kann.

Ein anderer Ansatz Neutrinos zu detektieren, führte zu AMADEUS. Dies ist ein Detektor, der in ANTARES installiert ist und einen akustischen Nachweis verfolgt. Analysiert wird hierbei die Druckwelle, die bedingt durch einen hadronischen Schauer, der aus der Reaktion eines Neutrinos mit Wassermolekülen folgt, entsteht. Die Detektion findet dabei über Hydrofone - also Mikrofone, die für den Betrieb unter Wasser ausgelegt sind - statt.

Da AMADEUS direkt in ANTARES integriert ist, liegt es nahe zu vermuten, dass ein durch die optischen Detektoren nachgewiesenes Event mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch von den akustischen Detektoren erfasst wurde. In der vorliegenden Arbeit wird daher die Korrelation zwischen nachgewiesenen optischen Events und ihren möglicherweise akustisch detektierten Pendants untersucht.

2.1 Akustische Neutrinodetektion

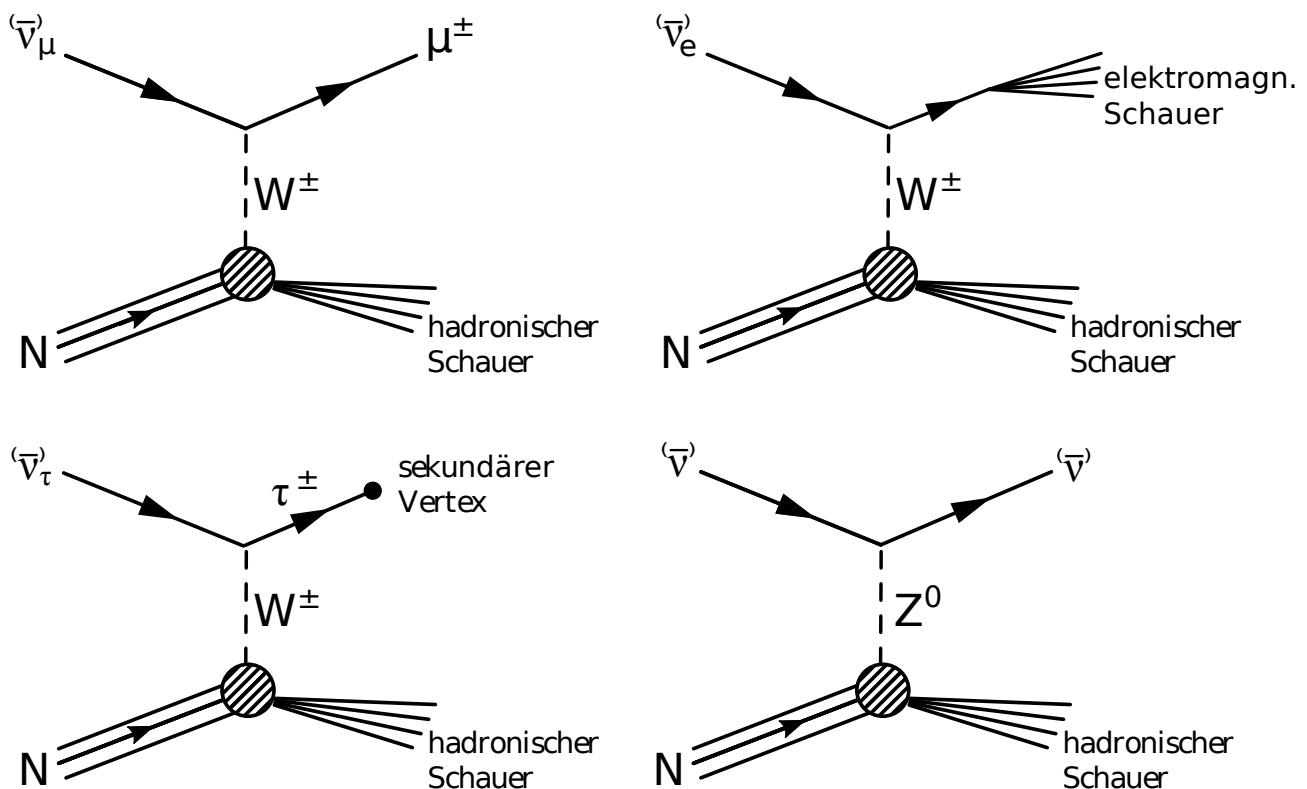


Abbildung 2.1: Feynman-Diagramme der möglichen Neutrino-Interaktionen.

Ein hochenergetisches Neutrino tritt ins Wasser ein und interagiert mit den Nukleonen N der Moleküle. Abbildung 2.1 zeigt die möglichen Reaktionen der Neutrinos unterschiedlichen Flavours [2]. In den Reaktionen entsteht je ein hadronischer Schauer, der seine frei werdende Energie in einem annähernd zylinderförmigen Volumen mit einem Radius einiger Zentimeter und einer Länge einiger Meter an das Wasser abgibt. Dies führt zu einer lokalen Erhitzung des umgebenden Mediums, das sich daraufhin nahezu instantan ausdehnt [3].

Daraus folgt eine Druckwelle, die sich in einer Fläche senkrecht zur Schauerrichtung und damit auch näherungsweise senkrecht zur ursprünglichen Impulsrichtung des Neutrinos ausbreitet. Sie kann in der Ebene ihrer Ausbreitung durch einen bipolaren Puls beschrieben werden, wie er in Abbildung 2.2 dargestellt ist.

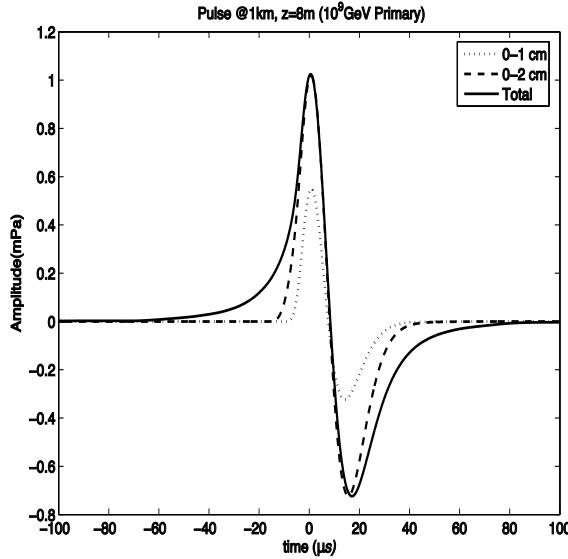


Abbildung 2.2: Simulierter bipolarer Puls, erzeugt durch einen hadronischen Schauer mit 10^{18} eV, wie er an einem akustischen Sensor in 1 km Entfernung auftreffen würde [4]. Etwa die Hälfte des Druckpulses wird innerhalb eines Radius von 1 cm (gepunktete Linie) um die Kaskade erzeugt. Die Energieabgabe innerhalb eines Radius von 2 cm (gestrichelte Linie) ist dabei fast vollständig für die Ausprägung der Pulsform verantwortlich [5].

Abbildung 2.3 zeigt den Druck der Welle in Abhängigkeit des Winkels zur beschriebenen Fläche. Da dieser mit zunehmenden Winkel abnimmt, ist er nur innerhalb eines kleinen Öffnungswinkels groß genug, um mithilfe von Hydrofonen detektiert werden zu können. Aufgrund der scheibenartigen Form der Druckwelle bezeichnet man diese häufig als „Pancake“.

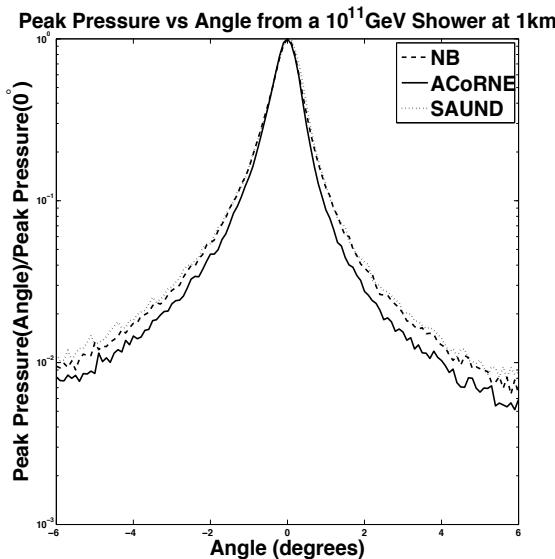


Abbildung 2.3: Auf den maximalen Wert normierte Darstellung der Abhängigkeit des Drucks vom Beobachtungswinkel für Daten von drei verschiedenen Simulationsmodellen [4].

2.2 ANTARES und AMADEUS

ANTARES ist, wie sein voller Name „**A**stronomy with a **N**eutrino **T**elescope and **A**byss environmental **R**ESearch“, verrät, ein Neutrino-Teleskop, das der Erforschung von Neutrinos und der Tiefsee dienen soll. Es befindet sich im Mittelmeer in einer Entfernung von ca. 40km zum Ort Toulon in Frankreich und ist dort in einer Tiefe von 2475 m unter der Wasseroberfläche am Meeresboden stationiert [6].

Der Detektor besteht aus zwölf sog. Lines und einer Instrumentation Line, die häufig auch als Line 14 bezeichnet wird. Diese umfassen in ihrem Aufbau je ein langes Kabel, an dem einzelne Messapparaturen aufgereiht sind, einen schweren Anker, der sie auf dem Meeresboden fixiert und am anderen Ende eine Boje, die durch ihren Auftrieb dafür sorgt, dass das Kabel straff bleibt und sich die Positionen der Detektormodule aufgrund von Unterwasserströmungen nicht zu stark ändern.

Abbildung 2.4 zeigt den schematischen Aufbau des Detektors. Jede Line ist zusätzlich in Stockwerke eingeteilt, die hier als Punkte dargestellt sind. An diesen sind die einzelnen Detektormodule angebracht.

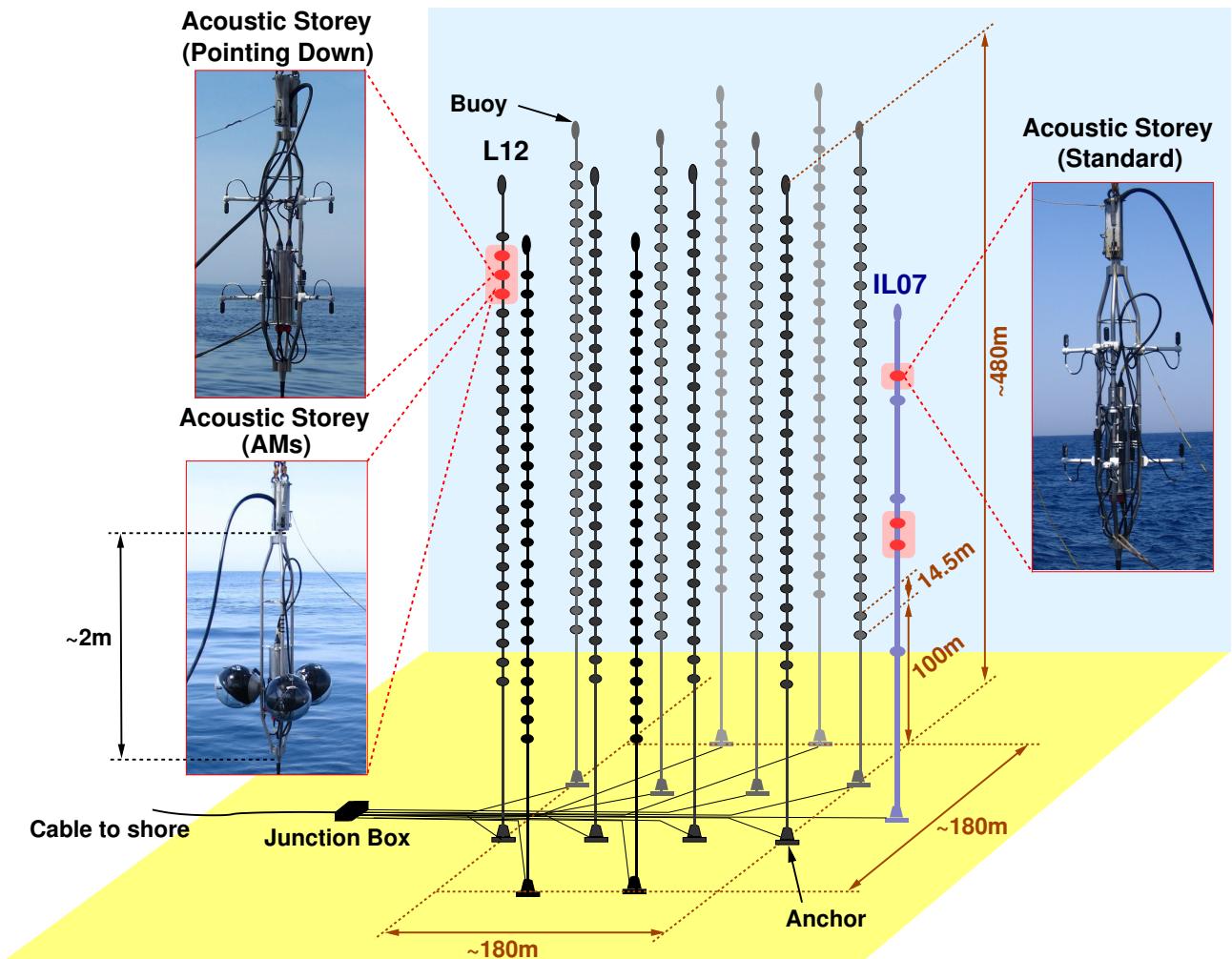


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau des ANTARES Detektors. Die Stockwerke der akustischen Detektoren sind rot hinterlegt. Line 12 (L12) enthält dabei die Stockwerke mit den Nummern 21 bis 23 und Instrumentation Line 07 (IL07 bzw. L14) die Stockwerke 2, 3 und 6. Die Nummerierung nimmt hierbei in Richtung Wasseroberfläche zu [7].

Die akustischen Module zur Neutrinodetektion, befindlich auf Line 12 (L12) und Instrumentation Line 07 (IL07 bzw. L14), werden als eigener Detektor, genannt *AMADEUS*- „**ANTARES** Modules for the Acoustic Detection Under the Sea“ - zusammengefasst [8].

In Grafik 2.4 sind zusätzlich die verschiedenen Typen der eingesetzten akustischen Stockwerke dargestellt. Abbildung 2.5 zeigt die schematische Anordnung der Hydrofone in einem Stockwerk des Standardtyps und dessen ungefähren Abmessungen.

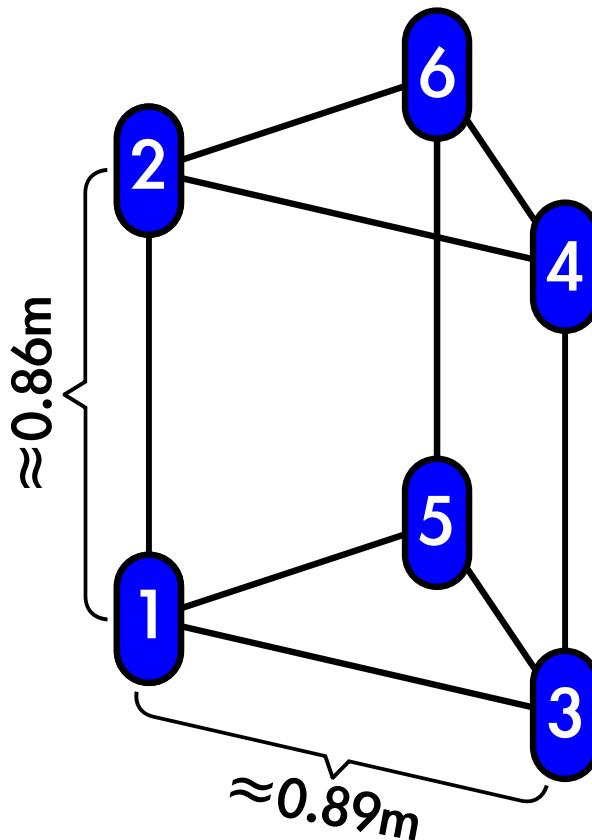


Abbildung 2.5: Anordnung und Nummerierung der Hydrofone in einem Stockwerk des Standardtyps.

Die von den Detektormodulen eines Stockwerks aufgezeichneten Werte werden über die jeweilige Line versandt, wobei jede einzelne von ihnen mit einer gemeinsamen Junction Box verbunden ist. Dort werden alle Daten gesammelt und ungefiltert an das an der Küste befindliche Kontrollzentrum in La Seyne-sur-Mer weitergeleitet. Erst dort werden sie gefiltert und zur weiteren Nutzung gesichert. Die Filterung an Land hat den großen Vorteil, dass eine Umstellung der eingesetzten Verarbeitung einfach möglich ist und keine Veränderungen direkt am Detektor stattfinden müssen.

In der durchgeführten Untersuchung wurden nicht alle Hydrofone des Detektors mit einbezogen. Auf den verschiedenen Stockwerken sind Module unterschiedlicher Bauart eingesetzt. Hydrofone des Typs „LTI“, deren Signalqualität schlechter als die der anderen ist, bleiben daher unberücksichtigt. Im Detail bedeutet dies für Stockwerk 3 ein und für Stockwerk 23 vier Hydrofone weniger.

Stockwerk 21 ist ein Prototyp eines sog. akustischen Moduls. Dabei sind die piezoelektrischen Messinstrumente in einer Glaskugel, die der eines optischen Moduls entspricht, eingeklebt. Die Daten dieses kompletten Stockwerks fließen ebenfalls nicht mit in die Auswertung ein.

3.1 Eigenschaften

3.1.1 Optische Daten

Aus Messungen mit dem optischen Detektor und den dabei aufgezeichneten Werten, konnten durch Rekonstruktion die Vertices von Events, die bedingt durch Neutrinos Tscherenkov-Licht ausgesandt haben, bestimmt werden. In der Arbeit von [9] wurden Schauerereignisse, d.h. Ereignisse, die ein sphärisches Gebiet hoher Lichtdichte erzeugen, untersucht. Nach einer durchgeführten Selektion blieben die Events übrig, die in der Tabelle im Anhang A aufgelistet sind. Die Messphasen des Detektors sind in sogenannte Runs unterteilt. Anhand der vergebenen Run-ID kann in einer internen Datenbank von ANTARES nachgesehen werden, zu welcher Zeit eine Messung gestartet wurde und wie lange die zugehörige Messdauer war.

Nach der Reaktion eines Neutrinos mit einem Wassermolekül entsteht eine Kaskade sekundärer Teilchen, die die Aussendung von Tscherenkov-Licht zur Folge hat. Das in Tabelle A angegebene Datum mit seiner jeweiligen Uhrzeit ist der genaue Zeitpunkt t_O des ersten Hits in einem Photomultiplier des optischen Detektors, der unter der Annahme einer unendlich großen Lichtgeschwindigkeit im Wasser als identisch zum Moment der Lichtaussendung betrachtet wird. Aus den optischen Daten wurde der wahrscheinlichste Zeitpunkt t_{int} - die sog. Interaktionszeit - des Emissionsmaximums der ausgesandten Photonen rekonstruiert und angenommen, dass dies der Moment ist, an dem der Schauer vollständig ausgeprägt ist.

Es wird weiterhin angenommen, dass dies auch den Zeitpunkt der Entstehung der akustisch nachzuweisenden Druckwelle darstellt und dass der Vertex des optischen Events und der Punkt, von dem der Schauer ausgeht, dieselbe Position besitzen. Dabei entsteht ein systematischer Fehler im Bereich von 1-2 m, der klein im Vergleich zu dem in Abschnitt 4.2.1 abgeschätzten statistischen Fehler ist und somit vernachlässigt werden kann.

In der Tabelle sind zudem die rekonstruierten Koordinaten \vec{p} der Vertices in Einheiten von Metern im UTM-System, sowie die Impulseinheitsrichtung des zugehörigen Schauers \vec{n} angegeben. Für die verwendeten Koordinaten ist hierbei lediglich je die relative Lage zueinander von Bedeutung, sodass die absolute Position irrelevant ist. Aus der Intensität des durch ein Event erzeugten Tscherenkov-Lichts ist zudem die Energie des Schauers bestimmbar, die ebenfalls aufgelistet ist.

3.1.2 Akustische Daten

3.1.2.1 Runs

Die vom Detektor aufgezeichneten akustischen Daten sind ebenfalls in Runs unterteilt, die parallel zu den optischen Messungen aufgezeichnet werden. Diese Runs besitzen jedoch andere Dauern und andere vergebene IDs. Aus der Bekanntheit des Eventzeitpunkts aus den optischen Werten müssen entsprechend die akustischen Runs gewählt werden, die eben diesen Moment enthalten.

Die Zeitpunkte, wann ein Event in den akustischen Daten erwartet wird, können mithilfe der optischen Daten berechnet werden. Bekannt ist die Zeit t_O und die Interaktionszeit Δt_{int} , die je im Abschnitt 3.1.1 beschrieben wurde. Der Moment, an dem die akustisch nachzuweisende Druckwelle, die aus der Interaktion mit dem Neutrino hervorgeht, entsteht, ergibt sich damit aus der Summe der vorherigen beiden Zeiten. Gesucht ist letztendlich der Zeitpunkt, an dem die Welle an einem Hydrofon ankommt, an dem sie detektiert werden kann.

Zur Vereinfachung wird hier jeweils der Schwerpunkt eines jeden Stockwerks verwendet. Dessen Koordinaten \vec{S}_i berechnen sich aus den bekannten Koordinaten der einzelnen Hydrofone über

$$\vec{S}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \vec{x}_{\text{HF}ij},$$

wobei N_i die Anzahl der Hydrofone im Stockwerk i ist und $x_{\text{HF}ij}$ die Koordinaten des j -ten Hydrofons des Stockwerks sind.

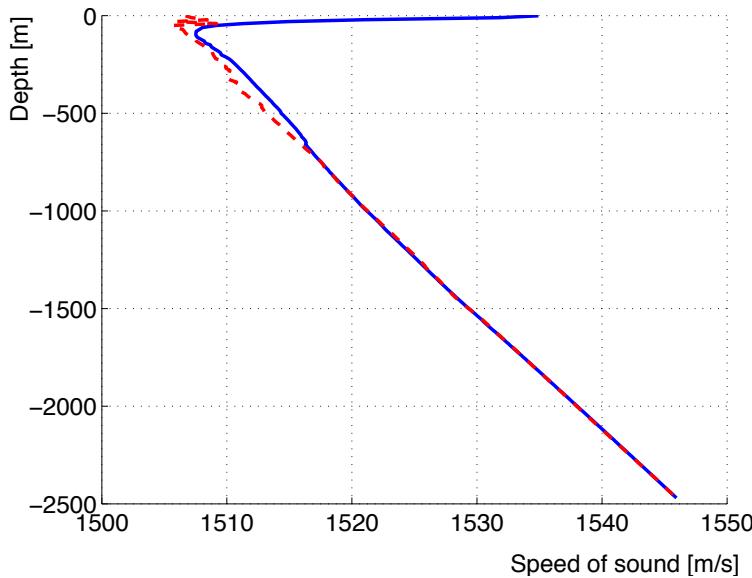


Abbildung 3.1: Schallgeschwindigkeit im Wasser in Abhängigkeit des Abstands zur Wasseroberfläche. Dargestellt sind die Messung an ANTARES im August 2007 (blaue Linie) und März 2010 (rot gestrichelte Linie) [1].

Als Schallgeschwindigkeit im Wasser wird nach der Abbildung 3.1 aus [1] ein konstanter Wert von

$$v_s = 1540 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.1)$$

angenommen. Durch Berechnung der Abstände d zwischen Eventvertices und Stockwerks-schwerpunkten kann über

$$\Delta t_d = \frac{d}{v_s}$$

die Laufzeit der Druckwelle berechnet werden.

Laut [10] wurde bis September 2011 der Messzeitpunkt der aufgezeichneten Daten von ANTARES nicht korrekt bestimmt.

Die Zeitsynchronisation in ANTARES (das sog. Clock-System) basiert auf einem stabilen Taktgeber mit einer Frequenz von 20 MHz. Dies entspricht einem zeitlichen Abstand der Clock-Impulse von 50 ns. Alle 2^{23} Zyklen, entsprechend einer Zeit von 419,4304 ms, wird ein sog. RTS

(Reset Timestamp) Signal - auch als IRQ0-Signal bezeichnet - erzeugt. Der Start eines Runs ist mit diesem Signal synchronisiert. Ab diesem Zeitpunkt wird die Anzahl der bislang generierten RTS-Pulse gezählt. Ein weiterer Zähler wird bei jedem stattgefundenen RTS-Signal auf null gesetzt und sichert ab diesem Moment die Anzahl der generierten Impulse des Taktgebers. Aus gezählten RTS- und Clock-Pulsen und ihren bekannten zeitlichen Abständen kann damit stets auf den Zeitpunkt der momentan aufgezeichneten Daten zurückgerechnet werden [11].

Der zeitliche Verlauf der Signalfolge während einer Messung zum Beginn eines Runs ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Sobald das IRQ0-Signal auftritt, wird relativ zu diesem Zeitpunkt die Zeit Δt_i aus der Anzahl der seit dem Start vergangenen Taktzyklen berechnet, sodass sich die aktuelle Zeit ergibt zu

$$t_i = t_{\text{IRQ0}} + \Delta t_i.$$

Bei ANTARES wird der Zeitpunkt von IRQ0 selbst jedoch nicht festgehalten. Stattdessen wird im Fall der optischen Daten für diese Zeiten der Zeitpunkt des IRQ2-Signals, das die Bereitschaft der Datennahme signalisiert (DAQ - Data AcQuisition), als Nullpunkt gewählt und entsprechend addiert

$$t_i = t_{\text{IRQ2}} + \Delta t_i.$$

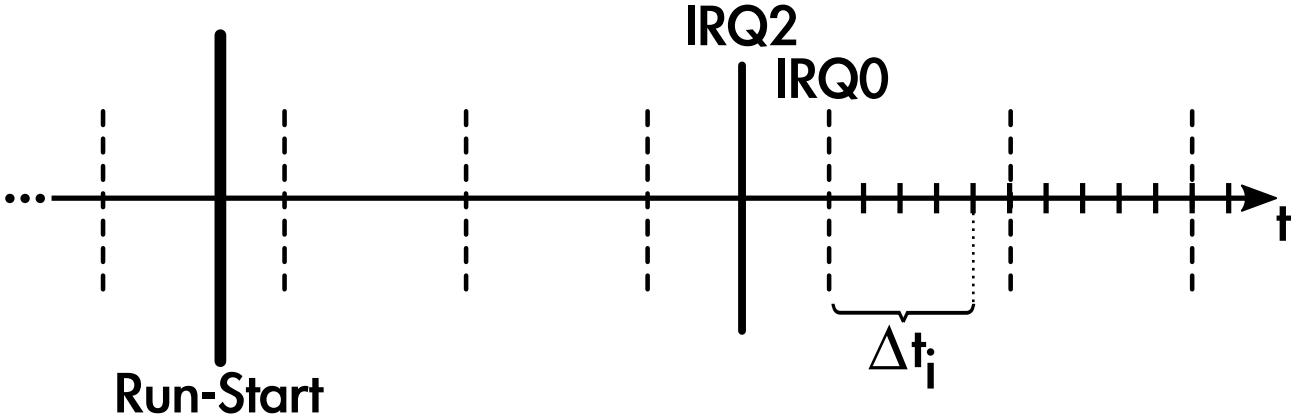


Abbildung 3.2: Zeitliche Abfolge der Steuersignale während einer Messung (schematische Darstellung - zeitliche Abstände sind nicht maßstabsgetreu).

Für die AMADEUS-Daten erfolgte stets ein korrektes Zeitnehmen, sodass es zu einer Zeitdifferenz zwischen optischen und akustischen Daten kommt

$$\Delta t_{\text{IRQ}} = t_{\text{IRQ0}} - t_{\text{IRQ2}}.$$

Nach einem Programm von [10] lässt sich diese Differenz Δt_{IRQ} berechnen, die je zum Zeitpunkt des Auftretens eines optischen Events addiert werden muss.

Insgesamt ergibt sich der zu untersuchende Zeitpunkt in den akustischen Daten t_A also zu

$$t_A = t_O + \Delta t_{\text{int}} + \Delta t_d + \Delta t_{\text{IRQ}}. \quad (3.2)$$

3.1.2.2 Signaldaten

Die Messdaten des aufgezeichneten zeitlichen Verlaufs des Signals eines Hydrofons werden analog prozessiert und mit einer Abtastrate von 250 kHz in Datenpunkte mit einem zeitlichen Abstand von 4 ms digitalisiert, sodass letztendlich Zeitpunkte und eine zugehörige Amplitude in arbiträren Einheiten erzeugt werden.

Ansließend werden die Daten an Land geschickt und dort gesichert. Online kann auf den Server an der Küste zugegriffen werden, um eine Vorselektion der Daten anzuwenden [8].

Alle akustischen Daten der Hydrofone eines Runs werden in eine einzelne Datei komprimiert, die sich über das Internet anhand der Run-ID beziehen lässt. Mithilfe des Software-Frameworks SeaTray, das auf dem für den Detektor IceCube entwickelten Framework IceTray basiert und für ANTARES weiterentwickelt wurde, können die Signaldaten der einzelnen Hydrofone wieder aus den Run-Dateien extrahiert werden [12] [13].

Zusätzlich wird das Framework genutzt, um aus den erhaltenen Signaldaten die Zeitpunkte festzustellen, an denen ein Ereignis stattfand. Ein Algorithmus prüft dabei, ob sich im Signal Datenpunkte vom Rauschen abheben und ob der Verlauf einem gesuchten bipolaren Puls entspricht. Ist dies der Fall, wird der genaue Zeitpunkt, an dem das Ereignis auftrat, gesichert. Diese Zeiten dienen später der statistischen Auswertung der Messdaten.

3.2 Reduktion

Die Anzahl der zu untersuchenden Runs soll gleich zu Beginn stark reduziert werden, da dies zum einen die Menge an Daten, aber auch den Rechenaufwand und damit die Zeit, bis ein Ergebnis feststeht, erheblich reduziert.

3.2.1 Aktivität der Lines

Nicht mit allen Lines des Detektors wird stets gemessen. Kommt es zu Problemen wie technischen Defekten, so kann eine Line unter Umständen für lange Zeiträume ausfallen und mit ihr werden keine Daten aufgezeichnet. Wann welche Line aktiv war, kann dabei einer regelmäßig aktualisierten Tabelle der internen Antares-Dokumentation entnommen werden [14]. Die für diese Arbeit relevanten Angaben sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1: Zeiträume und jeweilige Runs, wann welche Line des Detektors aktiv war.

Run Start	Datum	Run Ende	Datum	aktive Lines
32073	2008-02-15	34430	2008-05-28	L14
34434	2008-05-30	35072	2008-06-24	L14 + L12
35149	2008-09-06	35072	2008-12-24	L14 + L12
38111	2008-12-24	44466	2009-11-12	L14
44476	2009-11-14	52852	2010-10-27	L14 + L12
52898	2010-11-03	70318	2013-04-16	L12

Von den ursprünglich 60 optischen Runs existieren für 47 akustische Runs im entsprechenden Zeitraum, in dem der Detektor aktiv gemessen hat. Da bei einigen Runs nur eine Line aktiv war, werden in den folgenden Ausführungen auch stets nur die auf ihnen befindlichen, aktiven Hydrofone beachtet.

3.2.2 Abstand

Im Folgenden werden Runs selektiert, die aufgrund der geometrischen Lage der aus den optischen Daten rekonstruierten Eventvertices und Richtungen der einlaufenden Neutrinos infrage kommen, mit dem akustischen Detektor ein durch ein Neutrino bedingtes Event detektiert zu

haben.

Die durch einen hadronischen Schauer erzeugte Druckwelle wird hierbei als unendlich dünn betrachtet. Das heißt, der Druck breitet sich innerhalb einer Fläche, die in guter Näherung senkrecht zur Impulsrichtung des Neutrinos steht, aus. Die normierte Richtung selbst kann dabei als Normalenvektor \vec{n} der eben genannten Ebene angesehen werden, für die der allgemeine Zusammenhang einer Ebenengleichung in Normalenform gilt

$$(\vec{x} - \vec{p}) \cdot \vec{n} = 0. \quad (3.3)$$

Dabei ist \vec{p} der Stützvektor, in diesem Fall der Vertex des Events und \vec{x} ein beliebiger Punkt, der falls er auf der Ebene liegt, die Gleichung erfüllt.

Um abschätzen zu können, ob ein Event ein potenzieller Kandidat für die Auswertung ist, wird der kürzeste Abstand d_p zwischen der deklarierten Ebene und den Schwerpunkten der Hydrofonstockwerke berechnet. Dieser ist in Abbildung 3.3 gezeigt. Die Grafik stellt dabei eine zweidimensionale Projektion des eigentlich dreidimensionalen Problems dar.

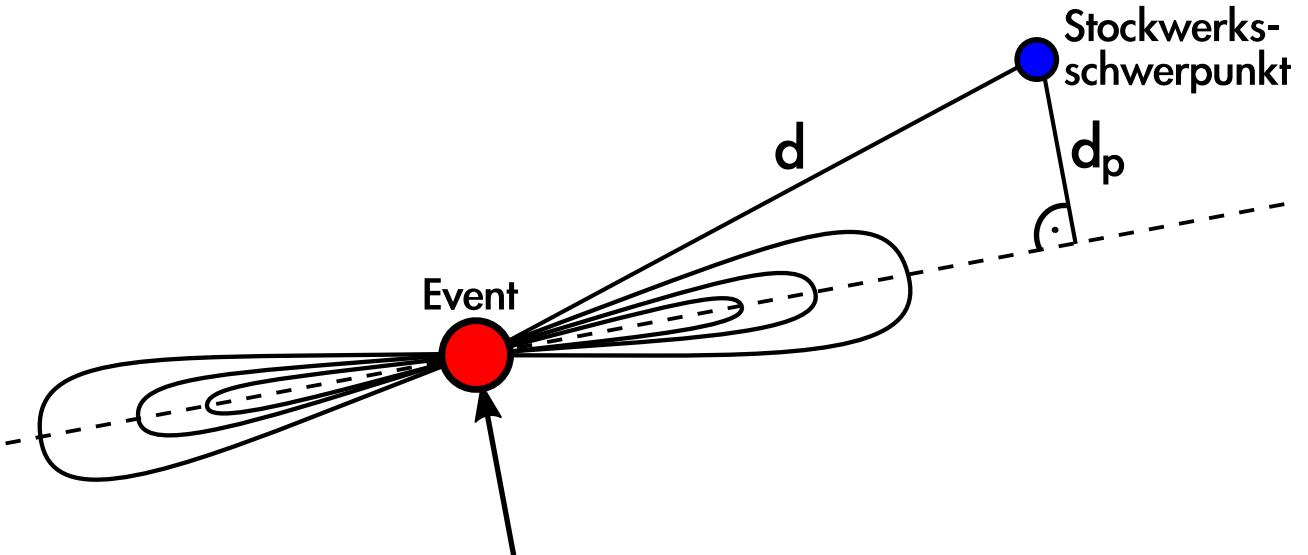


Abbildung 3.3: Ein Event erzeugt eine Druckwelle, die sich senkrecht zur Bewegungsrichtung des Neutrinos ausbreitet. Unter der Annahme, dass die Druckwelle unendlich dünn ist, kann der kürzeste Abstand d_p zwischen ihr und einem Hydrofon berechnet werden.

Da die Vertexrekonstruktion aus optischen Daten mit einer Ungenauigkeit verbunden ist und in der Berechnung die Stockwerksschwerpunkte verwendet werden, wird zur groben Abschätzung ein relativ großer Abstand von 40m gewählt, der unterschritten werden muss, damit der Run selektiert wird. D.h., es wird gefordert

$$d_p < 40 \text{ m.}$$

Die Koordinaten der Eventvertices \vec{p} und der normierten Impulsrichtung \vec{n} , die die Ebene der Druckwelle aufspannen, können direkt den Daten der optischen Events der Tabelle aus Anhang A entnommen werden. Gleichung (3.3) wird erweitert, um den kürzesten Abstand d_p zwischen Ebene und einem beliebigen Punkt \vec{x} zu bestimmen. Es gilt

$$d_p = \vec{n} \cdot (\vec{x} - \vec{p}).$$

Die Selektion wurde für die gegebenen optischen Events vollzogen. Es blieben 16 akustische Runs übrig, die in Tabelle 3.2 gelistet sind. Dabei enthalten sind die jeweiligen Run-IDs der akustischen Runs und die nach Gleichung (3.2) berechneten Zeitpunkte, an denen Events erwartet werden.

Es existieren mehrere Einträge pro Run, da aufgrund der unterschiedlichen Distanzen d zwischen Vertices und Stockwerksschwerpunkten auch unterschiedliche Messzeiten für alle Stockwerke, die Detektionspotenzial besitzen, folgen.

Abbildung 3.4 zeigt die zu Beginn gegebenen optischen Events und in Blau dargestellt die Events, die als potenzielle Kandidaten selektiert wurden.

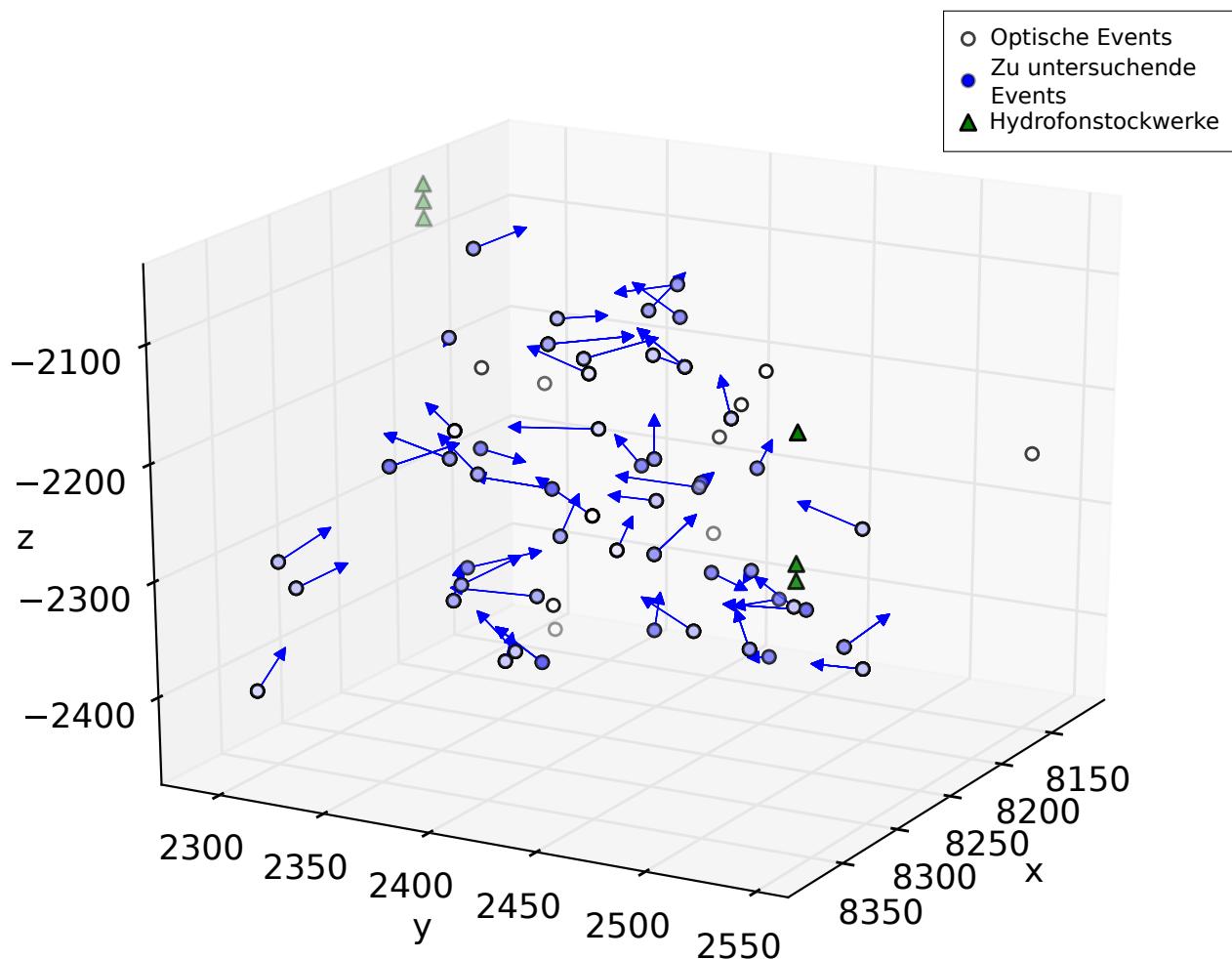


Abbildung 3.4: Koordinaten der Hydrofonstockwerke und optischen Events. Die blauen Punkte geben die Events an, die nach der Selektion als zu untersuchend übrig bleiben. Von diesen ist zudem je der Impulsvektor des Schauers dargestellt.

Zusammenfassend stellt Abbildung 3.5 das Flussdiagramm, das den Ablauf des Programms zur Filterung der Runs nach dem beschriebenen Verfahren wiedergibt, dar.

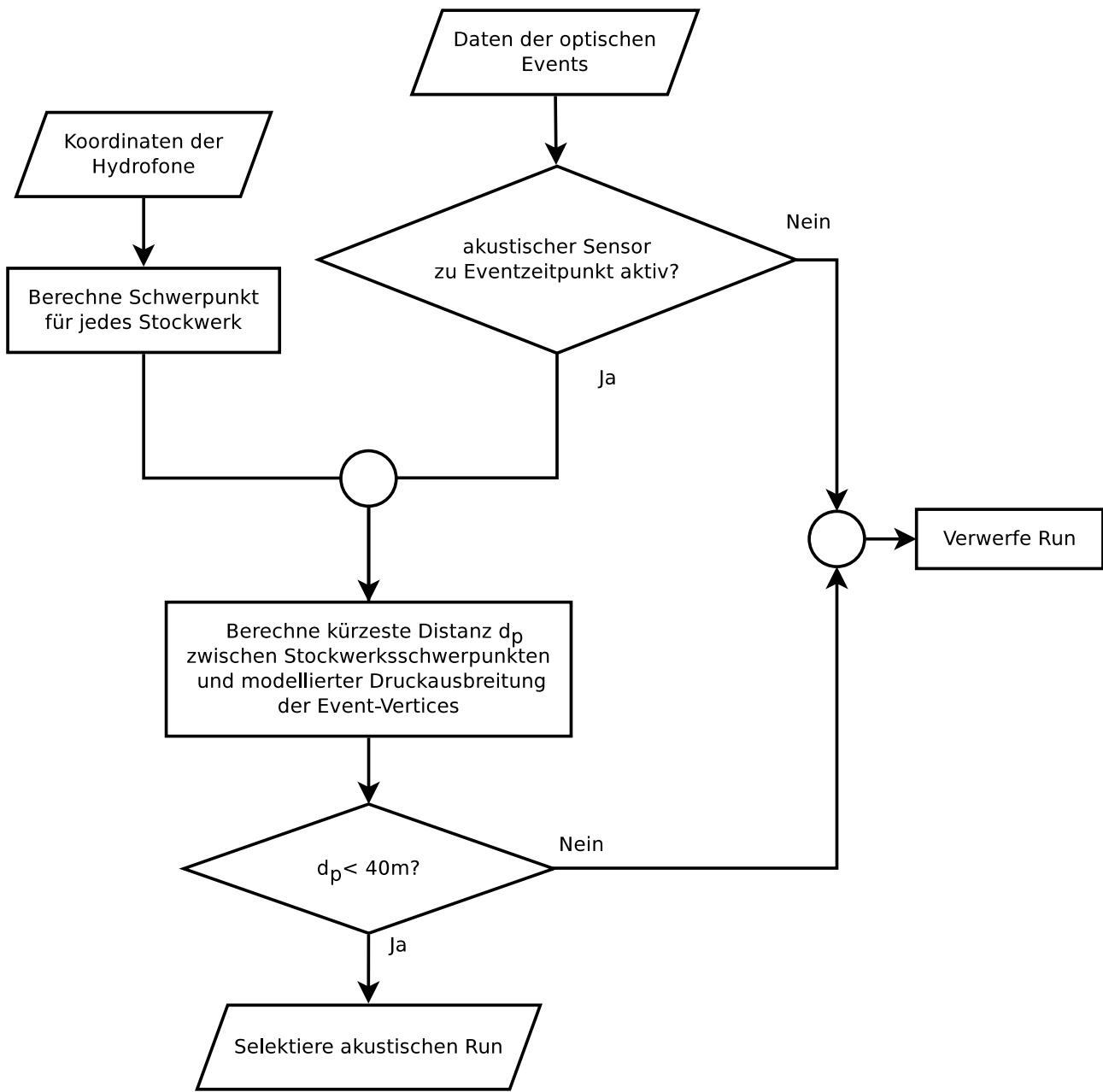


Abbildung 3.5: Flussdiagramm zur Filterung der akustischen Runs aus den gegebenen optischen Runs anhand errechneter Abstandsdaten zwischen Hydrofonstockwerken und rekonstruierten Eventvertices. Dargestellt ist der Ablauf zur Entscheidung, ob ein einzelner Run behalten oder verworfen wird.

Tabelle 3.2: 16 akustische Runs, die potentielle Events enthalten. Zusätzlich eingetragen sind die Abstandsdaten, die der Selektion dienten.

ID	Datum	Zeitpunkt (UTC)	Line	Stockwerk	d [m]	d_p [m]
33712	2008-04-23	03:48:40.777,177,676	14	2	151.299390329	35.6405269052
35334	2008-09-13	11:48:30.299,312,548	12	21	110.656132434	-34.0861548612
	2008-09-13	11:48:30.307,116,905	12	22	122.674841579	-31.2041264086
	2008-09-13	11:48:30.315,143,111	12	23	135.035199411	-28.3572187191
35934	2008-10-02	21:20:49.279,014,268	14	2	117.42287935	23.7720015157
	2008-10-02	21:20:49.282,276,273	14	3	122.446366624	35.3356331535
36476	2008-10-18	02:45:03.615,241,779	14	2	127.497837788	-8.01452906617
	2008-10-18	02:45:03.623,060,062	14	3	139.537994812	-0.303542004426
36550	2008-10-21	23:33:15.939,560,600	14	6	155.509477206	17.6677779893
37784	2008-12-12	08:40:20.319,284,420	14	6	259.513169612	-15.7061154422
40117	2009-04-13	08:02:31.110,322,438	14	2	49.4203769017	-15.9454983734
	2009-04-13	08:02:31.118,310,072	14	3	61.7213327103	-12.5592726227
	2009-04-13	08:02:31.187,290,639	14	6	167.95140638	13.4603616439
45949	2010-01-20	08:21:30.932,331,361	14	6	64.8472049509	-30.1815443602
49514	2010-06-22	11:44:08.540,895,783	12	21	133.110715977	1.65166430317
	2010-06-22	11:44:08.546,989,893	12	22	142.495645558	5.48624298696
	2010-06-22	11:44:08.553,515,541	12	23	152.545144326	9.23603831156
	2010-06-22	11:44:08.575,643,633	14	2	186.622405162	-1.97045397053
	2010-06-22	11:44:08.568,579,228	14	3	175.743221029	1.7782280925
	2010-06-22	11:44:08.533,047,332	14	6	121.024101167	30.5262657548
51410	2010-08-23	00:47:00.037,988,680	14	2	165.973264028	-24.1577158093
	2010-08-23	00:47:00.041,590,865	14	3	171.520628315	-18.2226910171
	2010-08-23	00:47:00.086,158,380	14	6	240.154601314	27.3074580027
52088	2010-09-20	06:03:47.792,578,498	14	2	134.53859796	14.4769373706
	2010-09-20	06:03:47.794,199,520	14	3	137.034971292	28.1315228421
58891	2011-08-04	15:44:58.453,112,331	12	21	119.014407428	19.7097501952
	2011-08-04	15:44:58.458,930,374	12	22	127.974193619	33.026722632
60705	2011-11-02	10:54:16.313,597,508	12	21	31.8490728398	-4.08115380901
	2011-11-02	10:54:16.320,759,230	12	22	42.8781244831	6.10478639564
	2011-11-02	10:54:16.328,955,392	12	23	55.5002146395	16.1640245313
64912	2012-06-19	05:00:03.697,535,226	12	21	322.446337912	30.819960761
	2012-06-19	05:00:03.706,230,891	12	22	335.837662569	33.2660999234
	2012-06-19	05:00:03.714,858,549	12	23	349.124256099	35.743955062
65260	2012-07-04	21:42:13.685,799,458	12	21	216.178925248	28.4902797289
	2012-07-04	21:42:13.695,372,471	12	22	230.921365141	30.1184391541
	2012-07-04	21:42:13.704,809,643	12	23	245.454609048	31.7876299676
65429	2012-07-12	16:09:07.887,643,085	12	23	119.423637719	-38.4368310433

3.2.3 Definition eines Events

Um die Selektionskriterien besser an die von Neutrinos erwarteten Signale anzupassen, sind weitere Maßnahmen erforderlich. Hierbei werden einige Bedingungen an die aufgezeichneten Signale gestellt, die diese letztendlich als Event klassifizieren. Gedanke ist dabei, dass die Messdaten nur dann von brauchbarem Wert sind, wenn aus ihnen der ursprüngliche Vertex, an dem das Event stattgefunden hat, rekonstruiert werden kann.

Folgende Definition wird dabei für ein Event gewählt:

- Mindestens vier Hydrofone müssen das Signal aufgezeichnet haben
- Höchstens ein definierter Teilbereich des Gesamtdetektors hat das Event detektiert

Die Bedingung der vier Hydrofone ist dabei wichtig für die Rekonstruktion. Die zweite Bedingung, dass nur ein Teil des gesamten Detektors das Event festgestellt hat, ist für das im nachfolgenden Abschnitt 3.2.4 beschriebene Verfahren zur Klassifikation von Neutrino-Kandidaten von Bedeutung.

3.2.4 Klassifikation von Neutrino-Kandidaten

3.2.4.1 Simulierte Daten

Um einschätzen zu können, wie die Messdaten der einzelnen Hydrofone miteinander korreliert sind, werden in einem vorher definierten Volumen um den gesamten Detektor Events mit zufälliger Position und Impulseinheitsrichtung generiert.

Unter der Annahme, dass die Anzahl der Events, deren Signale den Detektor erreichen, mit zunehmender Distanz zu diesem exponentiell abfällt, bezeichnet die Abschwächlänge λ_{att} die Strecke, bei der die Wahrscheinlichkeit der Ankunft um einen Faktor $\frac{1}{e}$ abgenommen hat.

Nach dem Lambert-beerschen Gesetz gilt somit

$$P(x) = e^{-\frac{x}{\lambda_{\text{att}}}}.$$

Die Abschwächlänge wird mit 1km angenommen [1] und es wird festgelegt, dass diese Länge die maximale Entfernung zu einer Quelle darstellt, deren Signal ein Hydrofon noch erreichen kann.

Ein würfelförmiges Volumen mit einer Kantenlänge von 2km wird um das Detektorzentrum zentriert. Unter Vernachlässigung der Koordinaten, die unterhalb des Meeres, also bereits im Erdboden liegen, ergibt sich ein Quader, innerhalb dessen Grenzen für jede Koordinate eines Eventvertex Zufallszahlen generiert werden. Unter der Annahme, dass das Auftreten eines Events an jeder Stelle gleich wahrscheinlich ist, folgen die Zufallszahlen einer Gleichverteilung. Um den geforderten Abstand der Abschwächlänge einzuhalten, wird jedes Event, dessen Vertex nicht innerhalb einer Kugel mit Radius 1km um das Detektorzentrum liegt, verworfen.

Die Schauerrichtung jedes Events wird ebenfalls als gleich wahrscheinlich angenommen. Zu jedem vorher erzeugten Vertex wird ein zugehöriger Einheitsvektor erzeugt. In Abbildung 3.6 sind die generierten Events und die Schwerpunkte der Hydrofonstockwerke gezeigt.

Die sich in senkrechter Richtung zu den eben genannten Vektoren ausbreitende Druckwelle ist in der Realität nicht unendlich dünn. Daher wird abgeschätzt, dass ihr Druck unter einem halben Öffnungswinkel von

$$\varphi = 0,5^\circ$$

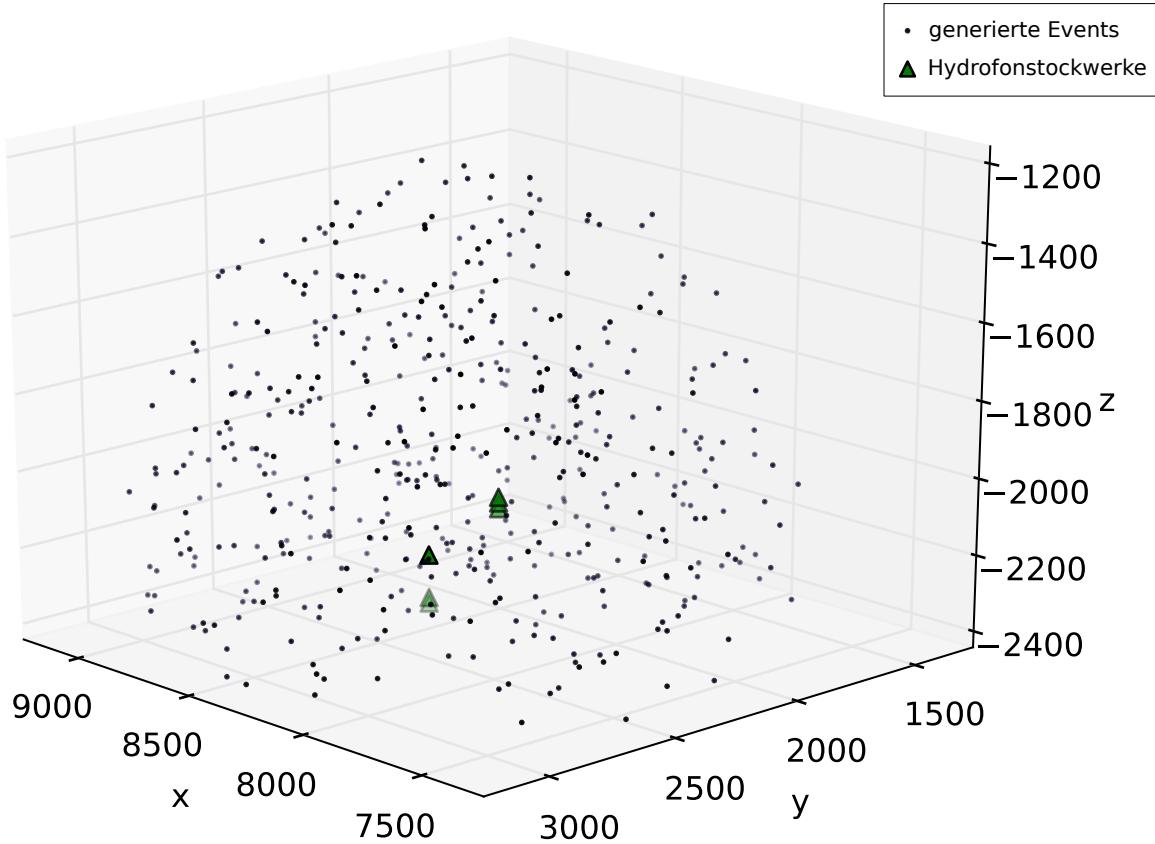


Abbildung 3.6: Im Volumen mit Radius der Abschwächlänge um das Detektorzentrum zufallszeugte Events.

noch groß genug ist, um detektiert werden zu können [15]. Für jeden generierten Vertex wird für jedes einzelne Hydrofon des Detektors wie in Abschnitt 3.2.2 der direkte Abstand d und kürzeste Abstand d_p zur Ausbreitungsrichtung berechnet. Anhand dieser Strecken kann der Winkel, unter dem ein Hydrofon getroffen wird, berechnet werden

$$\phi = \arcsin \left(\frac{d_p}{d} \right).$$

Ist ϕ kleiner als φ , so wird ein Signal vom jeweiligen Hydrofon registriert. Erst unter Voraussetzung der Definition eines Events in Abschnitt 3.2.3, dass vier Hydrofone ein Signal messen, gilt ein Event als detektiert.

Um die Korrelation der Daten zu prüfen, wird getrennt die Anzahl an Events gezählt, die je eine der folgenden Eigenschaften erfüllen

- N_S : Das Event wurde von Hydrofonen aus zwei oder mehr Stockwerken detektiert
- N_L : Das Event wurde von Hydrofonen auf beiden Lines detektiert
- $N_{6\&2,3}$: Das Event wurde von Hydrofonen aus Line 14, dabei von Stockwerk 6 und mindestens einem der Stockwerke 2 und 3 detektiert.

Die jeweilige Wahrscheinlichkeit p_i für eines der gelisteten Ereignisse mit den Raten N_i ist dabei gegeben als

$$p_i = \frac{N_i}{N},$$

wobei N die Gesamtanzahl an detektierten Events ist und im Falle von $N_{6\&2,3}$ die Anzahl der von Line 14 detektierten Events $N = N_{14}$ verwendet wird.

Von 10^6 im quaderförmigen Volumen generierten Events, lagen 578408 innerhalb des Radius der Abschwächlänge. Insgesamt wurden $N = 5437$ Events detektiert, dabei $N_{14} = 3037$ auf Line 14. Die sich daraus ergebenden Wahrscheinlichkeiten sind in Tabelle 3.3 gelistet.

Tabelle 3.3: Eventzahlen N_i und zugehörige Wahrscheinlichkeiten.

Anzahl Events	Wahrscheinlichkeit
N_S	p_S
N_L	p_L
$N_{6\&2,3}$	$p_{6\&2,3}$

Gesucht werden Korrelationen in den Messdaten, um Neutrino-Signale vom Untergrund zu trennen. Aus der Simulation ergibt sich, dass ein Event mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von p_S von mehreren Stockwerken detektiert wird. Dies gilt jedoch nicht für Stockwerke, die weit auseinanderliegen, wie die Wahrscheinlichkeiten p_L und $p_{6\&2,3}$ zeigen. Um ein mehrfaches Zählen registrierter Signale einzuschränken, wird daher der Ansatz gewählt, den Detektor in drei Segmente, bestehend aus der gesamten Line 12 und der in zwei Bereiche unterteilten Line 14, bestehend aus Stockwerk 6 und dem Verbund aus den Stockwerken 2 und 3 zu unterteilen. In Abbildung 3.7 sind die einzelnen Gebiete mit je unterschiedlichen Farben unterlegt dargestellt.

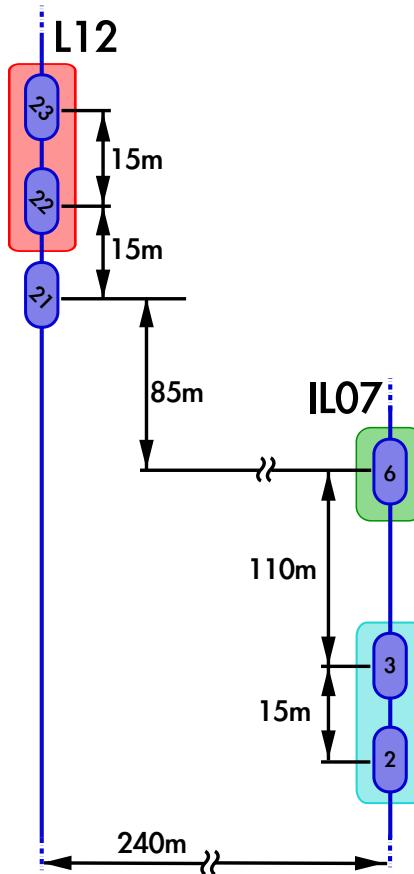


Abbildung 3.7: Einteilung des Detektors in drei Bereiche, die mit je unterschiedlicher Farbe unterlegt dargestellt sind.

3.2.4.2 Verfahren

Die Definition eines Events wird dazu verwendet, die Messdaten weiter zu reduzieren. Betrachtet werden dabei die Datenströme eines jeden Hydrofons pro Stockwerk. Die Signale, die miteinander korreliert sind, das heißt, die von mindestens vier Hydrofonen eines in Abschnitt 3.2.4.1 definierten Detektorbereichs detektiert wurden, werden beibehalten und die Restlichen aussortiert.

Dieses Aussortieren führt zur Entfernung von unkorrelierten Signalen, die offenbar keiner gemeinsamen Signalquelle zuzuordnen sind und damit als ein Teil des Untergrunds bestimmt wurden. Aus den Daten mehrerer einzelner Hydrofone wird damit ein Datensatz je Detektorbereich erzeugt, die in den später folgenden Auswertungen zum Einsatz kommen werden.

Findet ein akustisches Event im Detektor statt, so wird dies aufgrund der unterschiedlichen Distanzen zu den einzelnen Hydrofonen auch zu unterschiedlichen Zeiten registriert. Aus den Abständen der Hydrofone zueinander, unter Annahme einer konstanten Schallgeschwindigkeit im Wasser (siehe Gleichung (3.1)), lässt sich bei mehreren von verschiedenen Hydrofonen registrierten Signalen bestimmen, ob diese vom selben Event ausgingen.

Wie in Abbildung 3.8 gezeigt, ist der maximal mögliche zeitliche Abstand zwischen zwei Signalen, die zu den Zeitpunkten t_i und t_j detektiert wurden und die auf dasselbe Event zurückzuführen sind,

$$\Delta t_{ij} = t_j - t_i = \frac{|\vec{x}_j - \vec{x}_i|}{v_s}.$$

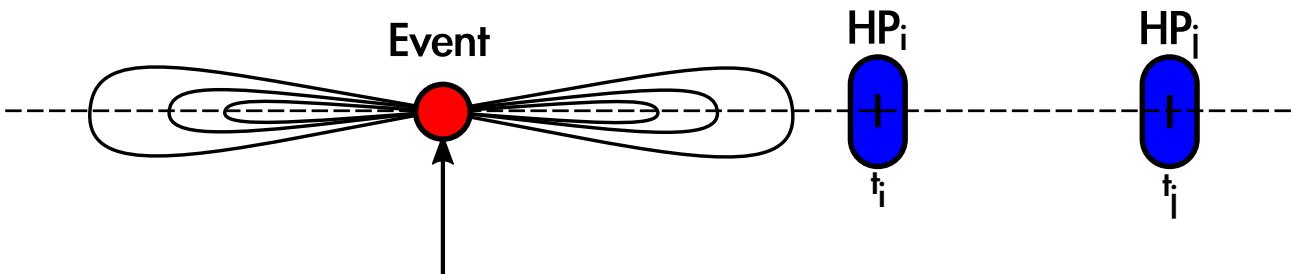


Abbildung 3.8: Maximal möglicher zeitlicher Abstand der Detektion eines Events von zwei Hydrofonen.

Abbildung 3.9 zeigt ein anderes mögliches Event. Hierbei wird Hydrofon i von der ausgesandten Druckwelle vor Hydrofon j getroffen. Der hierbei vorliegende effektive Abstand x'_{ij} ist geringer als der Abstand x_{ij} der Hydrofone zueinander.

Aus den Koordinaten der einzelnen Hydrofone lassen sich deren Abstände zueinander und damit die maximalen Zeitdifferenzen zwischen zwei Signalen desselben Events berechnen. Tabelle 3.4 zeigt diese exemplarisch für Stockwerk 6, das sich auf Line 14 befindet. Ein Algorithmus vollzieht mithilfe der Information aus den Abständen das vorher beschriebene Verfahren. Die Messdaten aller Hydrofone eines Stockwerks werden zusammengelegt und zeitlich sortiert. Das erste Signal wird betrachtet und relativ zu ihm die Zeitdifferenzen zu den Folgesignalen berechnet. Alle Signale, deren Zeiten kleiner sind, als die maximal erlaubte, werden akzeptiert und ihre Anzahl bestimmt. Liegt diese getreu der Definition eines Events bei größer oder gleich vier, so werden die Signale als ein Event zusammengefasst, indem die Zeit des zuerst betrachteten Signal festgehalten wird.

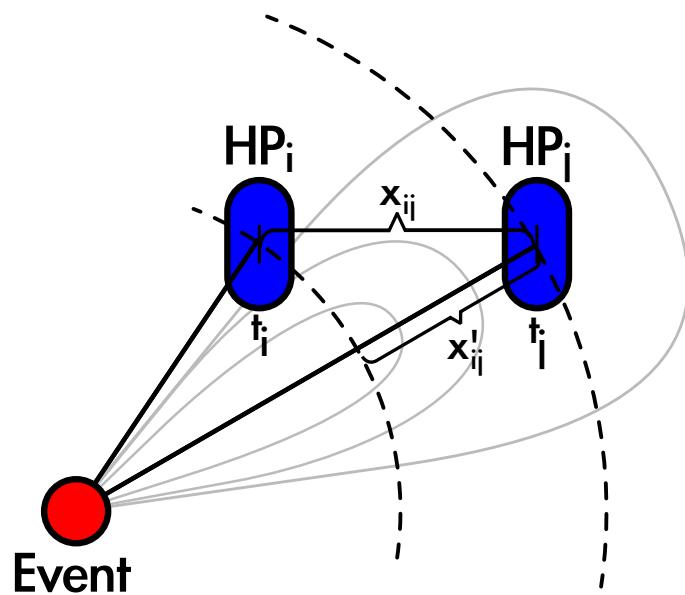


Abbildung 3.9: Die von einem Event ausgehende Druckwelle wird von den Hydrofonen zu unterschiedlichen Zeiten registriert, sodass aus dem zeitlichen Abstand der Detektion eine effektive Distanz x'_{ij} , die kleiner als der tatsächliche Abstand x_{ij} zwischen den Messpunkten ist, folgt.

Tabelle 3.4: Abstände und daraus berechnete maximale Zeitdifferenzen für Ereignisse an Hydrofonen des Stockwerks 6 auf Line 14.

Hydrofon i	Hydrofon j	x_{ij} [m]	Δt_{ij} [ms]
1	2	0,856	0,556
1	3	0,887	0,576
1	4	1,231	0,799
1	5	0,887	0,576
1	6	1,227	0,797
2	3	1,229	0,798
2	4	0,876	0,569
2	5	1,231	0,800
2	6	0,876	0,569
3	4	0,859	0,558
3	5	0,887	0,576
3	6	1,227	0,797
4	5	1,234	0,802
4	6	0,878	0,570
5	6	0,857	0,557

Abbildung 3.10 zeigt ein Beispiel, wie Signale voneinander differenziert werden. Jede Kurve steht dabei für ein Signal, das von einem Hydrofon aufgezeichnet wurde. Die Bezeichnung der Signale beginnt mit *OM*. Diese Kennzeichnung entstammt einem ANTARES-Standard und bedeutet **Optical Module**, die für den später installierten AMADEUS-Detektor der Einfachheit übernommen wurde. Nach dem Punkt folgt die Nummer der Line und darauf eine vierstellige Zahl, wobei die ersten zwei Ziffern für das Stockwerk und die letzten beiden für die Nummer des Hydrofons stehen.

Die ersten drei aufgezeichnete bipolare Pulse besitzen geringen zeitlichen Abstand, sodass sie als zusammengehörig angesehen werden. Ein weiter entferntes Signal, dargestellt durch die rote Kurve, müsste innerhalb des grau hinterlegten Bereichs liegen, um noch zu den anderen Signalen zu gehören. Bereits an der Pulsform ist zu erkennen, dass dies nicht der Fall ist und durch die zeitliche Differenz wird dies auch vom Algorithmus erkannt.

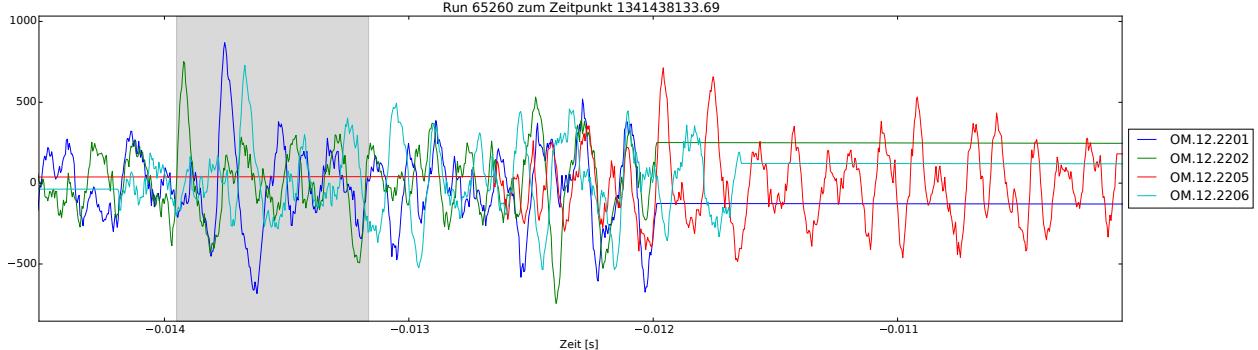


Abbildung 3.10: Ausschnitt aus den Signaldaten eines Runs, zur Verdeutlichung der Arbeitsweise des Algorithmus.

3.2.5 Fehler des Verfahrens und dessen Einschränkung

Ein möglicher Fehler des Verfahrens ist, dass Events, die innerhalb kürzester Zeit aufeinander auftreten, nicht aufgelöst werden können. Zur Verdeutlichung spreche wie in Abbildung 3.11 dargestellt ein erstes Event zur Zeit t_1 mehr als vier Hydrofone eines Detektorbereichs an. Ein weiteres Event findet zum Zeitpunkt t_2 unmittelbar darauf statt, sodass ein Hydrofon, das im gleichen Bereich liegt, ein Signal registriert.

Nach dem Verfahren zur Klassifikation von Neutrino-Kandidaten wird aus der Distanz zwischen dem zuletzt und dem zuerst angesprochenen Hydrofon des ersten Events ein Zeitbereich definiert, innerhalb der das letzte Signal noch zum vorher erfolgten Event gezählt wird. Da diese zeitlich so kurz aufeinander erfolgten, wird von beiden Events somit lediglich das Erste registriert.

Das Verfahren funktioniert auch, wenn der Detektor nicht in Bereiche unterteilt wird. Jedoch ist der beschriebene Fehler abhängig von der Distanz der Hydrofone zueinander. Je größer der Abstand, desto länger ist auch die Zeit, innerhalb der Signale zum selben Event gezählt werden. Aus den Dimensionen des Detektors, dargestellt in Abbildung 3.7 ergeben sich damit die definierten drei Bereiche, innerhalb derer die Hydrofondistanzen unter Einhaltung der durch die Simulation festgestellten Wahrscheinlichkeiten zur mehrfachen Detektion möglichst gering sind.

Ein weiterer Faktor, der den Fehler reduziert, ist die geringe Rate an Events, die in der Umgebung auftreten. Der Fehler tritt wie beschrieben nur dann auf, wenn zwei Events innerhalb kürzester Zeit hintereinander erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Eventrate von ν innerhalb eines Zeitraums von Δt auf ein Event ein weiteres erfolgt, berechnet sich durch Bilden der kumulativen Verteilungsfunktion der in Abschnitt 4.2.2.2 beschriebenen Gleichung (4.10) zu

$$P_{EE}(\Delta t) = \frac{1}{\nu} (1 - e^{-\nu \Delta t}).$$

Bei Raten im Bereich einiger Hertz und den Zeitbereichen, innerhalb der auf Signale gewartet wird, ist die beschriebene Wahrscheinlichkeit gering. Als Beispiel beträgt diese bei $\nu = 3$ Hz

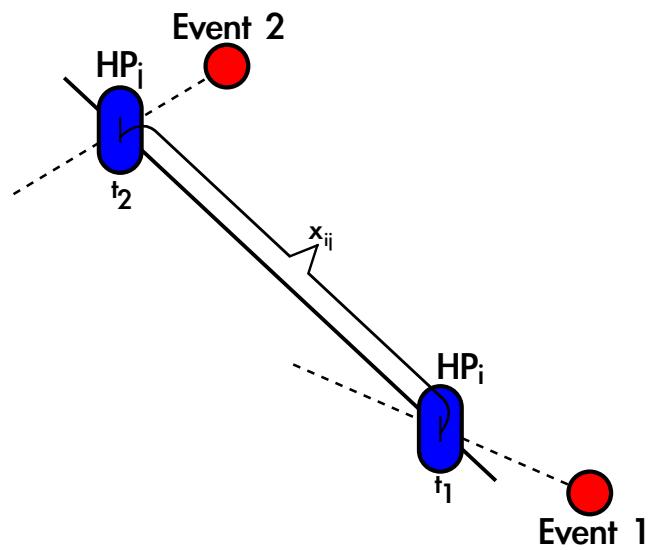


Abbildung 3.11: Ein erstes Event wird zum Zeitpunkt t_1 detektiert. Ein zweites Event erzeugt ein Signal in Hydrofon HP_j . Aufgrund des erlaubten Zeitbereichs, berechnet aus dem Abstand x_{ij} , innerhalb der ein Signal noch zum ersten Event gezählt wird, wird Event 2 nicht registriert.

und großem $\Delta t = 0,02$ s

$$P_{EE} = 0,019,$$

wobei dieser Wert hinreichend klein ist.

4.1 Signal - Abschätzung des Zeitfensters

Aus Abschnitt 3.1.2.1 ist der Zeitpunkt bekannt, an dem ein Event in den akustischen Daten erwartet wird. Dabei ist jedoch noch nicht berücksichtigt, dass die angegebenen Vertex-Positionen der optischen Daten in Tabelle A einer Rekonstruktion entstammen, die Fehlern unterliegt. Zudem wurden die Koordinaten der einzelnen Hydrofone über ein Positionierungsverfahren bestimmt, das ebenfalls eine mögliche Abweichung D_P zur tatsächlichen Position mit sich bringt. Diese wurde zur Sicherheit mit einem großen Wert von einem Meter abgeschätzt, der die tatsächliche Abweichung auf jeden Fall beinhaltet [16].

In [9] wurden die Fehler der optischen Vertexrekonstruktion über eine Simulation bestimmt. Dabei wurden Monte Carlo Events von Schauern mit bekannten Vertexpositionen generiert, deren Daten anschließend genutzt wurden, um die Vertices zu rekonstruieren. Abhängig von der Energie ergibt sich dabei eine Abweichung der Vertexpositionen, die in Abbildung 4.1 dargestellt ist.

Die Daten entstammen dabei [9] und wurden entsprechend gefittet. Die blaue Kurve steht für die mittlere Abweichung mit der Fitfunktion

$$f_{\text{Mittel}}(E) = 3,41767 \cdot \arctan(4,40843 \cdot E) + 2,92663. \quad (4.1)$$

Der grüne Graph für das 10%-Quantil, das heißt für den Wert, ab dem 10% aller erhaltenen Werte kleiner sind als der Wert selbst, gefittet mit

$$f_{10\%}(E) = 10,9088 \cdot \arctan(2,21677 \cdot E) + 4,70083, \quad (4.2)$$

wobei in beiden Formeln die Energie E in Einheiten von TeV einzusetzen ist und das Ergebnis die Dimension von Metern besitzt.

Aus den Daten der optischen Events wurde die mittlere Energie durch Berechnung des arithmetischen Mittelwerts gebildet. Diese bestimmt sich zu

$$\bar{E} = 7,206 \text{ TeV}.$$

In Abbildung 4.1 ist sie als rot gestrichelte Linie eingetragen. Eingesetzt in die Gleichungen (4.1) und (4.2) ergeben sich die Distanzen der Abweichungen zu

$$\begin{aligned} D_{\text{Mittel}} &= 8,19 \text{ m und} \\ D_{10\%} &= 21,16 \text{ m.} \end{aligned}$$

Die Abweichungen D stellen den Radius einer Kugel um die rekonstruierte Position des jeweiligen Elements, also eines Eventvertex oder eines Hydrofons dar. Abbildung 4.2 zeigt in einer zweidimensionalen Projektion den maximalen und minimalen Abstand, den Vertex und Hydrofon durch den Fehler bedingt zueinander einnehmen können.

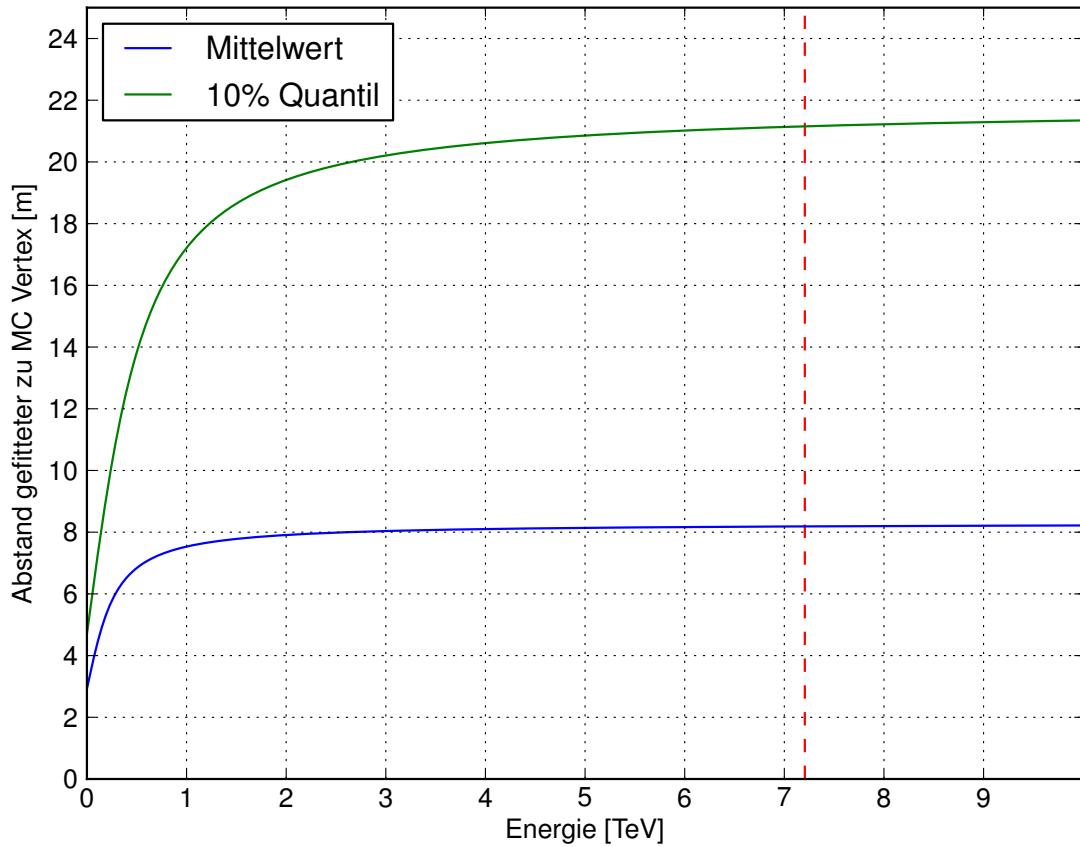


Abbildung 4.1: Abstand zwischen Monte Carlo generierten Vertices und aus den Simulationsdaten rekonstruierten Vertices in Abhängigkeit der Schauerenergie. Dargestellt ist die mittlere Abweichung und das 10%-Quantil. Die rot gestrichelte Line gibt den Mittelwert der Schauerenergie der verwendeten optischen Messdaten an.

Als extreme Gesamtabweichungen D_G ergeben sich unter konservativer Berechnung durch Bilden der Summe des Fehlers aus der Bestimmung der Hydrofonpositionen und der zwei Distanzen der Abweichungen der Eventvertices folgende Werte

$$D_{G_{\text{Mittel}}} = D_{\text{Mittel}} + D_P \text{ und}$$

$$D_{G_{10\%}} = D_{10\%} + D_P.$$

Setzt man eine konstante Schallgeschwindigkeit v_s im Wasser (siehe Gleichung (3.1)) voraus, erhält man damit die Zeiten

$$\Delta t_{\text{Mittel}} = \frac{D_{G_{\text{Mittel}}}}{v_s} = 6,0 \text{ ms und} \quad (4.3)$$

$$\Delta t_{10\%} = 14,4 \text{ ms,}$$

die die möglichen zeitlichen Abweichungen des berechneten Zeitpunkts, an dem die Druckwelle eines Events den akustischen Sensor erreicht, angeben.

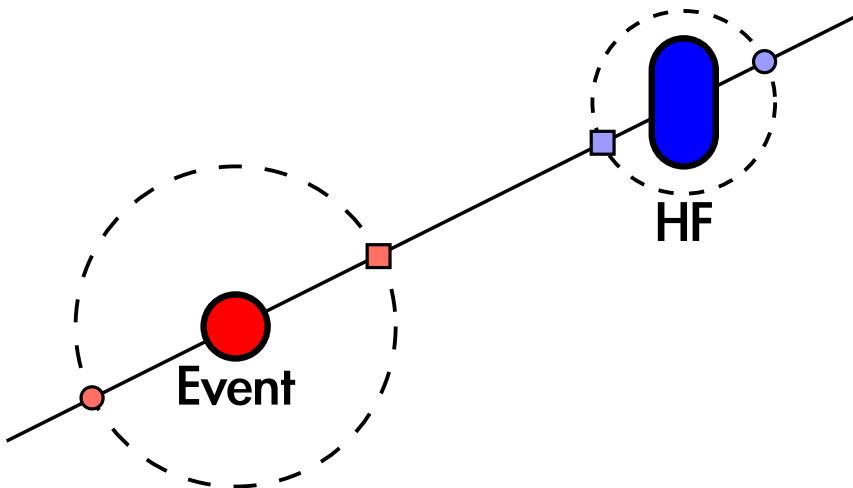


Abbildung 4.2: Die kleinen Kreise geben den maximalen, die Quadrate den minimalen Abstand zwischen Event und Hydrofon, bedingt durch den Fehler auf die Position der Elemente, an.

Damit ergeben sich zwei Zeitfenster, die symmetrisch um den Zeitpunkt des erwarteten akustischen Events liegen. In diesen Fenstern, die damit die doppelte Dauer der in den Gleichungen (4.3) berechneten Werte besitzen, wird in den Messdaten nach Events gesucht und falls vorhanden, ihre Anzahl notiert. Von nun an werden die Zeiträume als

$$\Delta t_k = 2\Delta t_{\text{Mittel}} = 12 \text{ ms} \quad \text{und}$$

$$\Delta t_g = 2\Delta t_{10\%} = 28,8 \text{ ms}$$

bezeichnet.

4.2 Untergrund

4.2.1 Betrachteter Zeitraum - ROI

In den folgenden Anwendungen, in denen das Verhalten des Untergrunds untersucht wird, wird ein fester Zeitraum um den Zeitpunkt, an dem das akustische Event erwartet wird, betrachtet. Dabei wird stets der Zeitbereich t_k bzw. t_g , der im letzten Abschnitt definiert wurde und in dem letztendlich nach dem erwarteten Ereignis gesucht wird, ausgenommen. Man erhält die sog. *Region of Interest (ROI)*, die für alle Runs als fester Wert von

$$ROI = 15 \text{ min},$$

gesetzt wird. Der Wert beruht dabei auf mehreren unternommenen Versuchen, wobei für die gewählte Zeit gute Ergebnisse erzielt wurden. Wählt man die Dauer zu kurz, so ist die Statistik schlechter, da die Anzahl der betrachteten Werte kleiner ist. Bei zu langer Dauer ist die Gefahr groß, stark fluktuierenden Untergrund, bzw. Störquellen mit sehr hoher Ereignisrate wie z.B. vorbeifahrende Schiffe mit einzuschließen.

4.2.2 Test auf Poissonverteilung

Die aufgezeichneten Messdaten setzen sich aus den Zeitpunkten detekterter Events zusammen. Betrachtet man einen fest gewählten Zeitraum, unter der Annahme, dass die Ereignisrate konstant ist, muss die Wahrscheinlichkeit, eine gewisse Anzahl an k Ereignissen zu detektieren, einer Poissonverteilung folgen. Für diese gilt

$$P(\lambda, k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}. \quad (4.4)$$

Dabei ist λ der Erwartungswert der Verteilung, der angibt, wie viele Ereignisse im betrachteten Zeitraum t zu erwarten sind. Er lässt sich außerdem schreiben als

$$\lambda = \nu t, \quad (4.5)$$

wobei ν die Ereignisrate ist. Da wir es mit realen Messdaten zu tun haben, deren Untergrundrate nicht konstant ist, sondern abhängig von aktuellen, nicht abzuschätzenden Gegebenheiten ist, muss geprüft werden, ob die Daten durch eine Poissonverteilung beschrieben werden können. In die Auswertung werden später nur Daten einfließen, die diese Eigenschaft erfüllen, da im anderen Fall angenommen wird, dass der Untergrund zu dominant ist, um ein Signal in ihm feststellen zu können. Im Folgenden sind zwei verschiedene Verfahren zum Test auf eine Poissonverteilung beschrieben. Die Anwendung auf reale Messdaten erfolgt im Abschnitt 6.2.1.

4.2.2.1 χ^2 -Hypothesentest

Der gesamte Untergrund in der zu untersuchenden Region um das erwartete Event (die ROI) wird in n kurze Intervalle je gleicher Länge unterteilt. Innerhalb eines jeden dieser Intervalle i , wobei $i \leq n$, wird die Menge an detektierten Ereignissen x_i gezählt. In einem Histogramm wird dann die Anzahl an Intervallen y_i in Abhängigkeit der x_i aufgezeigt, wobei die Fläche des Histogramms auf eins normiert ist. Dargestellt ist damit also die Wahrscheinlichkeit, innerhalb eines Intervallzeitraums t , x_i Events zu detektieren.

Unter der Annahme, dass die Daten Y poissonverteilt sind, also $y_i \sim P(\lambda, k)$ gilt, lässt sich der Erwartungswert λ der Verteilung nach der Maximum-Likelihood-Methode schätzen [17]. Für

die Likelihood-Funktion gilt dabei

$$\mathcal{L}(\lambda; y_1, \dots, y_n) = \prod_{i=1}^n P(\lambda, y_i) = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda^{y_i}}{y_i!} e^{-\lambda} = \frac{\lambda^{\sum_{i=1}^n y_i}}{\prod_{i=1}^n y_i!} e^{-n\lambda}. \quad (4.6)$$

Gesucht ist der Wert $\hat{\lambda}$, der 4.6 unter den gegebenen Messwerten y_i maximiert. Dazu wird zunächst die Log-Likelihood-Funktion gebildet

$$\ln \mathcal{L}(\lambda; y_1, \dots, y_n) = \ln \lambda \sum_{i=1}^n y_i - \left(\sum_{i=0}^n \ln(y_i!) \right) - n\lambda. \quad (4.7)$$

Über die Maximierungsbedingungen

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln \mathcal{L}}{\partial \lambda} \Big|_{\hat{\lambda}} &= 0, \\ \frac{\partial^2 \ln \mathcal{L}}{\partial \lambda^2} \Big|_{\hat{\lambda}} &< 0 \end{aligned}$$

erhält man den besten Schätzer für den Erwartungswert zu

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i. \quad (4.8)$$

Die Annahme der Poissonverteilung der Daten Y muss noch geprüft werden, da der vorher bestimmte Schätzer des Erwartungswertes sonst keine Gültigkeit besitzt. Dabei kommt ein χ^2 -Hypothesentest zum Einsatz, mit dessen Hilfe die Güte der Verteilung bestimmt wird. Es wird die zu testende Nullhypothese aufgestellt:

H_0 : Das Modell $P(\hat{\lambda}, k)$ beschreibt die Datenpunkte y_i hinreichend gut.

Dieser steht eine Alternativhypothese H_1 entgegen, die aussagt, dass das Modell die Datenpunkte nicht hinreichend gut beschreibt.

Die Prüfgröße, die die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten beschreibt, ist definiert als

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - NP(\hat{\lambda}, x_i))^2}{NP(\hat{\lambda}, x_i)^2},$$

wobei $N = \sum_{i=1}^n y_i$, die Gesamtanzahl an gezählten Intervallen ist, die mit P multipliziert wird, um die jeweilige erwartete Ereignisanzahl zu erhalten.

Die zu klärende Frage des Hypothesentests ist, ob die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden soll. Unter einem festgelegten Signifikanzniveau von

$$\alpha = 0,05$$

wird die Wahrscheinlichkeit p bestimmt, dass eine andere Durchführung der Messung zu modellkonformen Datenpunkten führt, bei der ein größerer und damit schlechterer Wert für χ^2 erreicht wird, als in der aktuell betrachteten Messung

$$p = \int_{\chi^2(\hat{\lambda})}^{\infty} d\chi^2 f(\chi^2, m) = 1 - F(\chi^2(\hat{\lambda}), m).$$

Dabei ist $f(\chi^2, m)$ die Funktion der χ^2 -Verteilung, deren zweiter Parameter m die Anzahl an Freiheitsgraden angibt und $F(\chi^2, m)$ die zugehörige Verteilungsfunktion. Die Anzahl der Freiheitsgrade bestimmt sich aus der Anzahl der Datenpunkte n und geschätzten Parametern w zu

$$m = n - w - 1 = n - 2.$$

Dabei ist $w = 1$, da nur der Erwartungswert $\hat{\lambda}$ geschätzt wird. Ist das Ergebnis der Rechnung $p \geq \alpha$, wird die Nullhypothese unter dem festgelegten Signifikanzniveau akzeptiert. Andernfalls wird die Hypothese verworfen und die Messdaten können nicht durch eine Poissonverteilung beschrieben werden.

4.2.2.2 Über Zeitdifferenz

Neben dem χ^2 -Hypothesentest existiert eine weitere Möglichkeit zu überprüfen, ob die Messdaten einer Poissonverteilung folgen. Grundlage ist dabei die Formel der Poissonverteilung selbst. Unter der Vorgabe, dass keine Ereignisse detektiert werden, folgt aus $k = 0$ eingesetzt in Gleichung (4.5) die Verteilung

$$P(\lambda = \nu t, k = 0) = e^{-\nu t}. \quad (4.9)$$

Betrachtet werden wieder Messdaten, die aus der zeitlichen Abfolge von Events bestehen. Gebildet wird je die Zeitdifferenz Δt_{ij} zwischen zwei Events i und j , wobei $i, j \leq N$ und N die Gesamtanzahl an Ereignissen ist. In diesen Zeiträumen liegen keine Ereignisse, sodass diese Information dazu verwendet werden kann, die Verteilung der Zeiten Δt_{ij} mittels Einsetzen in Gleichung (4.9) zu beschreiben. Diese lautet dann wie folgt

$$P(\nu, \Delta t) = e^{-\nu \Delta t}. \quad (4.10)$$

Die ermittelten Zeitdifferenzen werden histogrammiert, zu sehen in Abbildung 4.3.

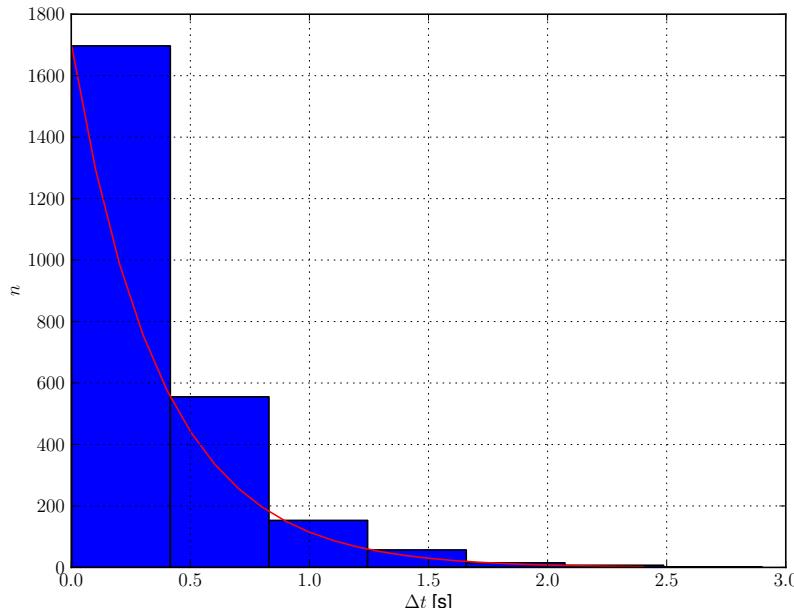


Abbildung 4.3: Histogramm der Zeitdifferenzen zwischen je zwei Ereignissen, die nach Abschnitt 6.1 zufallsgeneriert wurden. Die rote Kurve gibt den theoretischen Verlauf nach Gleichung (4.11) an.

Dargestellt ist dabei nicht die Wahrscheinlichkeit, wie in Gleichung (4.10) beschrieben, sondern die erwartete Anzahl an Ereignissen für ein bestimmtes Δt

$$N(\nu, \Delta t) = N_0 \cdot P(\nu, \Delta t) = N_0 e^{-\nu \Delta t}, \quad (4.11)$$

wobei N_0 die Anzahl der Ereignisse mit zeitlichem Abstand $t \rightarrow 0$ ist. Für die Anzahl der Ereignisse pro Histogramm-Bin N_i gilt der Zusammenhang mit der Gesamtzahl der Ereignisse

$$N = \sum_{i=0}^{\infty} N_i.$$

Die sich aus dem Histogramm ergebenden Datenpunkte können logarithmisch gefittet werden - das bedeutet ein Anwenden des natürlichen Logarithmus auf Gleichung (4.11) liefert die Fitfunktion

$$f(\nu, \Delta t) = \ln N_0 - \nu \Delta t.$$

Ist der Fit möglich und sinnvoll, so ist dies ein Indiz auf das poissonverteilte Verhalten der

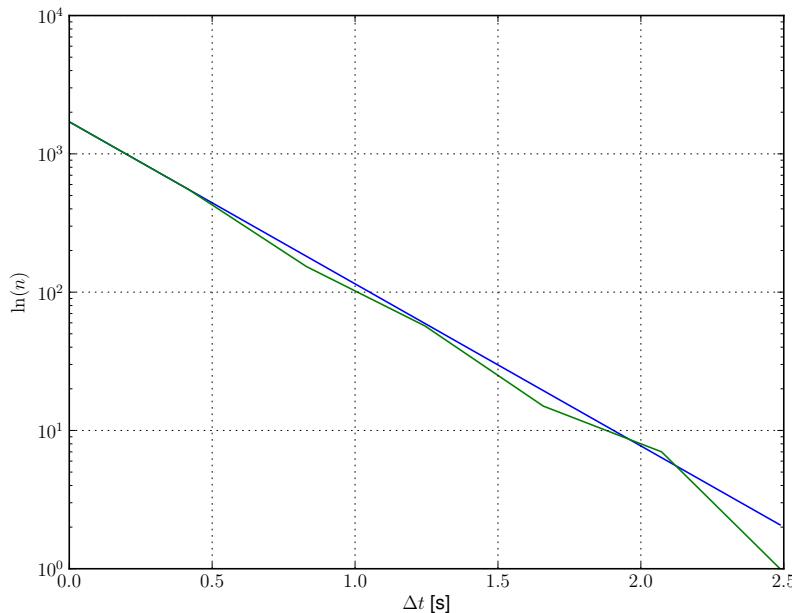


Abbildung 4.4: Logarithmischer Fit an die Zeitdifferenzen der Messdaten, die nach Abschnitt 6.1 zufallsgeneriert wurden.

Daten. Aus dem Fit selbst, kann dann die Ereignisrate ν bestimmt werden. Abbildung 4.4 zeigt den logarithmischen Fit an die Daten. In Abbildung 4.3 ist zusätzlich die Theoriekurve der gefitteten Parameter anhand Gleichung 4.11 eingetragen.

Das hier beschriebene Verfahren zeigt anschaulich, ob ein Datensatz einer Poissonverteilung folgt oder nicht. Es dient hierbei jedoch lediglich der Verifizierung des χ^2 -Hypothesentests, der im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde. Über diesen wird die Entscheidung getroffen, ob ein getester Run für die Auswertung selektiert oder verworfen wird.

5 Wahrscheinlichkeit, Untergrund zu messen

5.1 Wahrscheinlichkeit pro Run

Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit pro einzelnen Run, im in Abschnitt 4.2.1 festgelegten Zeitbereich, Untergrund zu detektieren. Dabei werden stets die Messdaten innerhalb des relevanten Zeitbereichs um den erwarteten Eventzeitpunkt vernachlässigt. Im Folgenden werden zwei verschiedene Methoden zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit dargestellt.

5.1.1 Über Poissonverteilung

Die nach Abschnitt 3.2.4 reduzierten Messdaten, die je die detektierten Events pro Detektorbereich enthalten, werden in einer Liste zusammengefasst und zeitlich sortiert. Die diesen Daten entsprechenden ROIs (siehe 4.2.1) werden gebinnt, das heißt in festgelegten Zeitintervallen wird sequentiell die Anzahl der detektierten Ereignisse gezählt. In diesem Fall wurde eine Binbreite von

$$\Delta t_I = 0,5 \text{ s}$$

gewählt, um mehr Messwerte pro Bin zu erhalten und so eine besseres Statistik zu erreichen. Im Histogramm, als Beispiel in Abbildung 5.1, ist dann die normierte Anzahl an Intervallen in Abhängigkeit der in ihnen aufgetretenen Events dargestellt. Die zur Erstellung des Histogramms verwendeten Daten wurden dabei nach einem Verfahren zufallsgeneriert, das im späteren Abschnitt 6.1 erklärt wird.

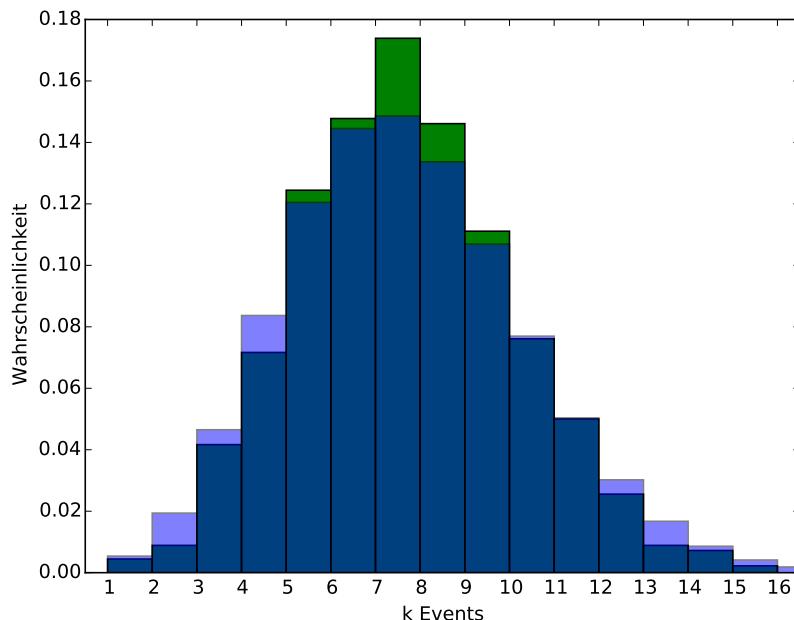


Abbildung 5.1: Das grüne Histogramm zeigt die poissonverteilten Daten, die nach Abschnitt 6.1 um einen Erwartungswert λ zufallsgeneriert wurden. Das blaue Histogramm stellt den theoretischen Verlauf der Poissonverteilung dar.

Nach Abschnitt 4.2.2.1 wird der Erwartungswert λ , also die mittlere Anzahl der gefundenen Events im Zeitbereich Δt_I , der Verteilung bestimmt und überprüft, ob die Daten um diesen poissonverteilt sind. Durch Umstellen von Gleichung (4.5) nach

$$\nu = \frac{\lambda}{\Delta t_I}$$

ergibt sich die Untergrundrate. Multipliziert man diese mit dem relevanten Zeitintervall, erhält man den erwarteten Untergrund λ_b in eben diesem Zeitbereich.

Die Wahrscheinlichkeit, mindestens ein Event zu detektieren, berechnet sich dann über

$$P(\lambda_b, k \geq 1) = 1 - P(k = 0), \quad (5.1)$$

wobei $P(\lambda_b, k)$ die Poissonverteilung beschreibt.

5.1.2 Über direkte Wahrscheinlichkeit

Die ROIs, die die Messdaten, die wie in Abschnitt 3.2.4 diskutiert reduziert wurden und die aus der zeitlichen Abfolge von Events bestehen, enthalten, werden in Intervalle des zu untersuchenden Zeitraums Δt eingeteilt. Wie in Abbildung 5.2 dargestellt, werden diese Intervalle sequentiell betrachtet und festgestellt, ob sie mindestens ein Event enthalten oder nicht. Aus

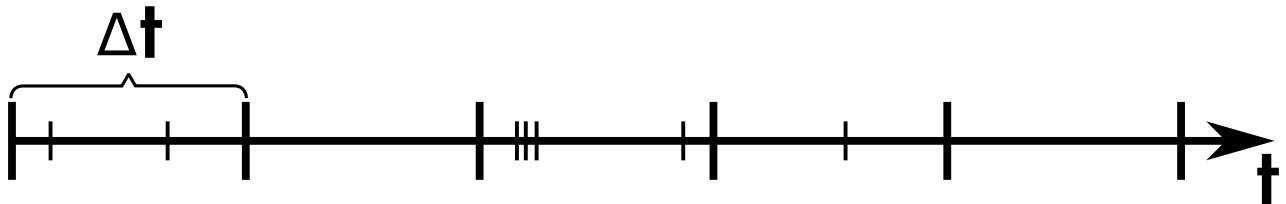


Abbildung 5.2: Der betrachtete Zeitraum wird in Intervalle fester Länge unterteilt. Über die Gesamtanzahl der Intervalle und der Anzahl der Intervalle, die Events enthalten, wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, im vorgegebenen Zeitraum ein Ereignis zu detektieren.

der Gesamtanzahl der Intervalle N_I und der Anzahl der Intervalle N_E , die Events enthalten, kann damit direkt die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mindestens ein Event im Zeitraum Δt zu detektieren

$$P_B(n \geq 1) = \frac{N_E}{N_I}. \quad (5.2)$$

Da die dabei verwendeten Messdaten sich je auf einen Detektorbereich beziehen, muss diese Berechnung für alle Bereiche vollzogen werden, wobei man die Wahrscheinlichkeiten P_{Bi} , mit $i \in [1, 2, 3]$, erhält.

Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit, mit dem gesamten Detektor mindestens ein Event in Δt zu detektieren. Unter der Annahme, dass die Detektorbereiche statistisch unabhängig sind, ergibt sich dabei die Beziehung

$$P(n \geq 1) = 1 - \prod_{i=1}^N P_{Bi}(n = 0) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{Bi}(n \geq 1)). \quad (5.3)$$

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit auf diese Weise soll dabei der Verifizierung der Methode aus Abschnitt 5.1.1 dienen.

5.2 Für alle Runs

Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit, in einer Menge von gegebenen Runs, im vorher definierten, zu untersuchenden Zeitbereich um ein vermutetes Event, Untergrund zu messen. Da die betrachteten Runs zu verschiedenen Zeiten aufgezeichnet wurden, sind die darin enthaltenen Daten nicht miteinander korreliert und können als statistisch unabhängig angenommen werden.

Aus Abschnitt 5.1.1 ist die Berechnung der Wahrscheinlichkeit für einen einzelnen Run bekannt. Die dabei aus den Daten erhaltenen Poissonverteilungen werden kombiniert, um eine Verteilung für alle Runs zu erhalten.

Dabei wird ausgenutzt, dass die Poissonverteilung reproduktiv ist, das heißt für statistisch unabhängige, poissonverteilte Größen X_i , deren Summe

$$X = \sum_{i=1}^N X_i$$

gesucht ist und deren Erwartungswerte λ_i bekannt sind, gilt

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i, \quad (5.4)$$

wobei N hierbei für die Anzahl an betrachteten Runs steht.

Die Wahrscheinlichkeit in allen an der Analyse beteiligten Runs k Events Untergrund zu detektieren, folgt damit einer Poissonverteilung mit Erwartungswert λ . Mindestens ein Event zu finden berechnet sich folglich über Formel (5.1).

6.1 Zufallserzeugte Daten

Um die implementierten Auswertealgorithmen zu testen, wurden Messdaten für einen Run generiert, die eine vorgegebene Wahrscheinlichkeit P besitzen, mindestens ein Event im betrachteten Zeitraum zu detektieren.

Grundlage ist dabei die Berechnung aus Abschnitt 5.1.2. Von den drei Gebieten, in die der Detektor eingeteilt ist, werden für zwei die Wahrscheinlichkeiten p_1 und p_2 vorgegeben, ein vorhandenes Event zu messen. Es gilt die Wahrscheinlichkeit P_E , dass ein Event eintritt. Für die letztendliche Detektionswahrscheinlichkeit eines Detektorsegments i gilt damit $P_{d_i} = p_i \cdot P_E$. Die verbleibende Wahrscheinlichkeit p_3 berechnet sich über Gleichung (5.3), die dann lautet

$$P = 1 - (1 - p_1 \cdot P_E)(1 - p_2 \cdot P_E)(1 - p_3 \cdot P_E)$$

$$\Leftrightarrow p_3 = \frac{1}{P_E} \left(1 - \frac{1 - P}{(1 - p_1 \cdot P_E)(1 - p_2 \cdot P_E)} \right)$$

Im Folgenden wird zur Erzeugung der Simulationsdaten

$$P = P_E$$

festgelegt. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens und der Detektion eines Events im vorgegebenen Zeitbereich sollen identisch sein. Wichtig ist hierbei die Wahl von P , der Wert von P_E kann frei gewählt werden.

Der Ablauf des Programms zur Generierung der Daten ist als Flussdiagramm in Abbildung 6.1 dargestellt. Es durchläuft eine Schleife, innerhalb der die aktuelle Zeit t in Intervallen Δt des zu untersuchenden Bereichs inkrementiert wird. Die Anzahl der Intervalle ist vorgegeben durch eine Startzeit t_{Start} und Endzeit t_{Ende} innerhalb der die Zeit t liegen darf und innerhalb der letztendlich Signale generiert werden. Ein Ereignis trete nun mit der Wahrscheinlichkeit P_E im aktuell betrachteten Intervall ein. Ist dies der Fall, so wird es mit Wahrscheinlichkeit p_i im Detektorbereich i erkannt, wobei eine Detektion in mehreren Bereichen möglich ist. Alle Hydrofone pro detektierendem Bereich i werden betrachtet. Aus ihnen werden zufällig mindestens vier gezogen - um die Definition eines Events zu erfüllen - und eine Liste gebildet. Ein zufälliger Zeitpunkt, der innerhalb des aktuellen Zeitintervalls liegt, wird für das erste Hydrofon gespeichert. Die Zeit wird anschließend für jedes weitere gelistete Hydrofon um einen Wert von $\Delta t_n = 10 \mu\text{s}$ erhöht und das Auftreten eines Signals aufgezeichnet.

Tritt kein Event im betrachteten Zeitraum auf, wird mit einer Wahrscheinlichkeit von $P_U = 0,01$ Untergrund erzeugt. Das heißt, wenn dieser Fall eintritt, werden aus einem zufällig ausgewählten Detektorbereich maximal drei Hydrofone selektiert und für diese wie zuvor Signale aufgezeichnet.

Am Ende ergibt sich für jedes Hydrofon eine Datei, in der die Zeiten der aufgetretenen Signale enthalten sind und deren Struktur identisch zu einer von SeaTray erzeugten Datei mit realen Messdaten ist.

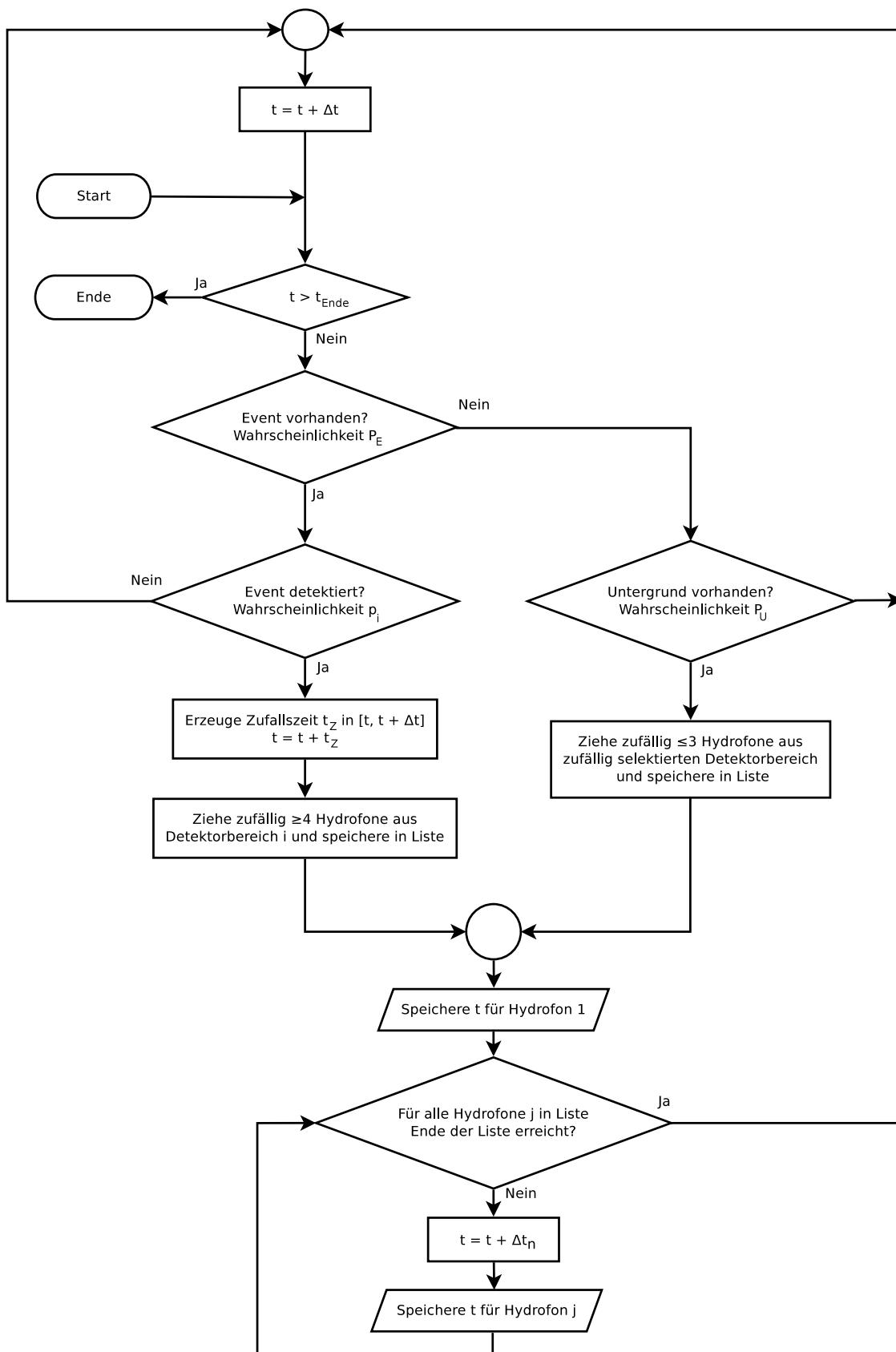


Abbildung 6.1: Flussdiagramm, das den Ablauf des Programms zur Erzeugung von Zufallsdaten für Events mit bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeit zeigt. Das Detektieren eines Events mit mehr als einem Detektorbereich ist möglich. Der Verlauf der Auswertung ist dabei identisch und wird nacheinander für jeden Bereich vollzogen, sodass zur einfacheren Darstellung hierbei nur die Auswertung eines einzelnen Bereichs gezeigt ist.

Tabelle 6.1 enthält die vorgegebenen Parameter, die sich hierbei stets auf den großen Zeitbereich Δt_g beziehen, und die aus der Auswertung folgenden Ergebnisse. Um zu zeigen, dass die Wahl der Wahrscheinlichkeiten p_i keinen Einfluss auf das Ergebnis hat, werden die Werte in jeder Messung variiert.

Angegeben sind die theoretischen Werte der Wahrscheinlichkeiten, also die Werte, mit denen Events generiert wurden und die mit der Hilfe dieser Events berechneten tatsächlichen Wahrscheinlichkeiten. Die aus der Auswertung stammenden Wahrscheinlichkeiten sind P_d , die über das Verfahren der direkten Wahrscheinlichkeit nach Abschnitt 5.1.2 bestimmt wurden und P_P , bestimmt aus der Poissonverteilung nach 5.1.1.

Tabelle 6.1: Parameter der Simulation und durch Auswertung erhaltene Wahrscheinlichkeiten.

vorgegebene Werte				Simulation					Ergebnis	
P	p_1	p_2	p_3	P_E	P	p_1	p_2	p_3	P_d	P_P
0,025	0,124	0,13	0,751	0,033	0,024	0,096	0,083	0,559	0,024	0,024
0,05	0,172	0,14	0,701	0,061	0,052	0,151	0,121	0,594	0,052	0,051
0,075	0,362	0,066	0,593	0,085	0,077	0,328	0,061	0,534	0,077	0,076
0,1	0,473	0,488	0,069	0,11	0,101	0,426	0,45	0,068	0,101	0,099
0,125	0,376	0,226	0,441	0,132	0,124	0,349	0,209	0,418	0,123	0,121
0,15	0,254	0,228	0,567	0,158	0,149	0,248	0,214	0,529	0,149	0,145
0,175	0,055	0,247	0,74	0,188	0,18	0,051	0,232	0,714	0,179	0,171
0,2	0,357	0,496	0,218	0,211	0,205	0,347	0,483	0,211	0,204	0,197
0,225	0,337	0,197	0,545	0,233	0,226	0,327	0,198	0,522	0,223	0,216
0,25	0,205	0,426	0,461	0,256	0,245	0,186	0,411	0,448	0,241	0,234
0,275	0,357	0,327	0,424	0,286	0,274	0,338	0,314	0,411	0,272	0,262
0,3	0,18	0,451	0,48	0,302	0,295	0,178	0,445	0,464	0,288	0,279
0,325	0,254	0,401	0,474	0,339	0,33	0,247	0,396	0,461	0,324	0,312
0,35	0,454	0,267	0,422	0,354	0,351	0,448	0,265	0,421	0,344	0,33
0,375	0,466	0,336	0,356	0,379	0,372	0,45	0,334	0,352	0,365	0,35
0,4	0,132	0,491	0,529	0,408	0,404	0,127	0,49	0,525	0,389	0,372

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den zufallserzeugten Werten P und den Werten P_d der Auswertung. Der mit der Wahrscheinlichkeit P_U eingebrachte Untergrund hat dabei keinen Einfluss auf das Ergebnis. Damit ist sichergestellt, dass der Algorithmus in der Lage ist, vorgegebene Daten hinreichend gut auszuwerten.

Zwischen P_P und P_d beträgt die mittlere relative Abweichung 0,057, was auf die unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten der Verfahren zurückzuführen ist. Da dieser Wert gering ist, wird die Funktion des Auswertprogramms zusätzlich verifiziert.

6.2 Messdaten

6.2.1 Korrelation akustischer und optischer Daten

Ein Anwenden des Auswerteprogramms auf die realen Messdaten unter Verwendung der Zeiträume t_k und t_g um die Zeitpunkte, an denen anhand der optischen Daten Events zu erwarten sind, ergibt die Wahrscheinlichkeiten gelistet in 6.2 und 6.3, in den jeweiligen Zeiträumen Untergrund zu messen. Aufgeführt sind dabei lediglich die Runs, die den Test auf eine Poissonverteilung nach dem Verfahren aus Abschnitt 4.2.2.1 bestanden habe.

Der angegebene erwartete Untergrund stammt dabei aus dem Erwartungswert λ_b des Untergrunds pro Run, der nach Abschnitt 5.1.1 bestimmt wurde.

Tabelle 6.2: Anzahl der Events innerhalb des Zeitraums $\Delta t_k = 12$ ms um die Zeitpunkte der erwarteten Events und sich ergebende Wahrscheinlichkeiten, im untersuchten Zeitraum Untergrund zu messen.

Run-ID	Events in Δt_k	In Δt_k erwarteter Untergrund	P_d	P_P
37784	1	0,106	0,101	0,1
51410	0	0,135	0,127	0,126
52088	0	0,036	0,036	0,035
60705	0	0,029	0,029	0,029
64912	0	0,06	0,059	0,057
65260	0	0,034	0,033	0,033
65429	0	0,02	0,019	0,02

Tabelle 6.3: Anzahl der Events innerhalb des Zeitraums $\Delta t_g = 28,8$ ms und Wahrscheinlichkeiten, im untersuchten Zeitraum Untergrund zu messen.

Run-ID	Events in Δt_g	In Δt_g erwarteter Untergrund	P_d	P_P
37784	1	0,254	0,228	0,224
51410	1	0,324	0,282	0,277
52088	0	0,086	0,084	0,083
60705	0	0,07	0,069	0,068
64912	0	0,143	0,140	0,133
65260	0	0,081	0,079	0,078
65429	0	0,048	0,044	0,046

Durch Aufsummieren der Untergrundevents gemäß Gleichung (5.4) ergeben sich die Erwartungswerte für den jeweiligen Gesamtuntergrund in den Zeitbereichen mit ihren nach der Poissonverteilung über $\sigma = \sqrt{\lambda}$ berechneten Standardabweichungen zu

$$\lambda_k = 0,419 \pm 0,647$$

$$\lambda_g = 1,008 \pm 1,004.$$

Die Anzahl der festgestellten Events liegt damit innerhalb des 1σ -Intervalls um den jeweiligen Erwartungswert, sodass in diesem Fall nicht von der Detektion eines Events gesprochen werden kann, bzw. keine Feststellung der Korrelation zwischen optischen und akustischen Daten ausgemacht werden kann.

Um zu erkennen, ob es sich bei den gefundenen Events um Untergrund oder um ein bipolares Signal handelt, sind in den Abbildungen 6.3 und 6.2 die genauen Signalverläufe, für alle Hydrofone, die das jeweilige Event detektiert haben, dargestellt.

Hier zeigt sich, dass das Signal in Run 37784 ausgeprägter ist. Seine Amplitude, angegeben in arbiträren Einheiten, ist um über einen Faktor drei größer als in Run 51410. Die bipolaren Pulse sind dabei im Ansatz gut zu erkennen, wohingegen das Signal in Run 51410 so verrauscht ist, dass diese hier nicht eindeutig ausgemacht werden können.

Die betrachteten Signale sehen nicht danach aus, aus einem Event mit einem Neutrino zu stammen. Dies bestätigt zusätzlich die vorher durchgeführte qualitative Analyse.

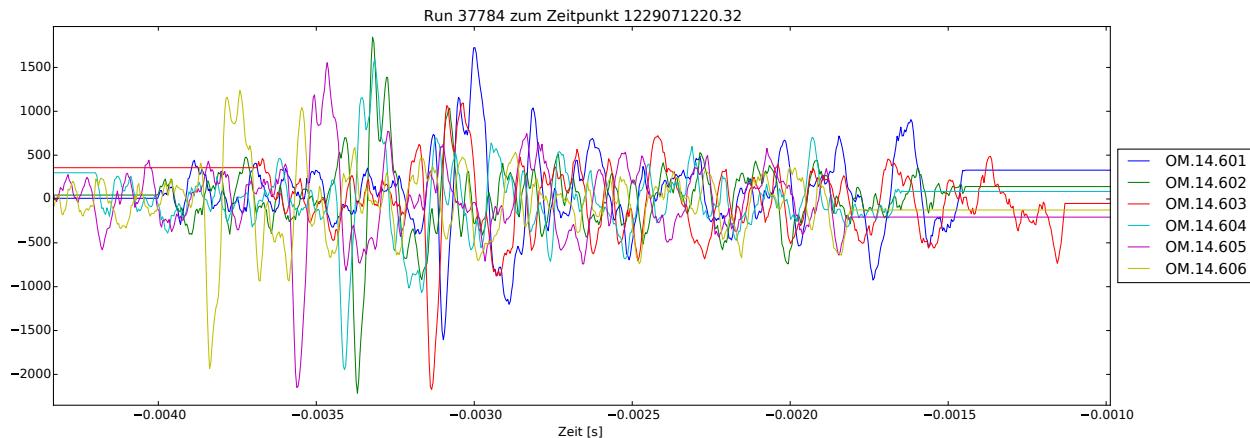


Abbildung 6.2: Signalverlauf des Events aus Run 37784, aufgetreten in Δt_k und Δt_g .

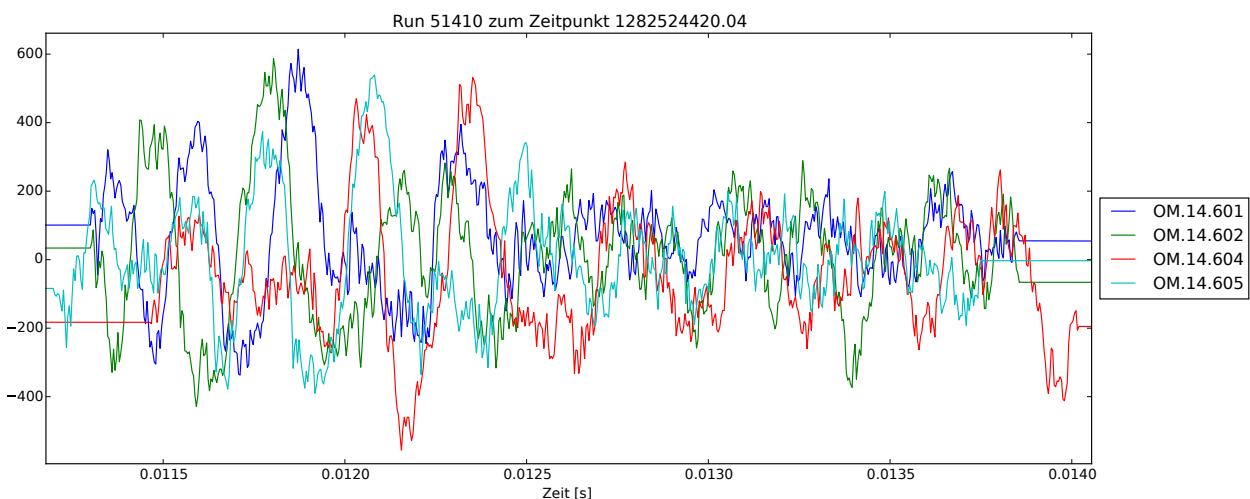


Abbildung 6.3: Signalverlauf des Events aus Run 51410, aufgetreten in Δt_g .

6.2.2 Erweiterte Untersuchungen

Ein weiterer Zeitbereich von 1 s um den erwarteten Zeitpunkt des Neutrino-Signals wird untersucht, um zu zeigen, inwiefern die Anzahl der dort festgestellten Events mit der bestimmten Untergrundrate verträglich ist.

Tabelle 6.4: Anzahl der Events innerhalb des Zeitraums $\Delta t = 1$ s und Wahrscheinlichkeiten, im untersuchten Zeitraum Untergrund zu messen.

Run-ID	Events in Δt	In Δt erwarteter Untergrund
37784	9	$8,82 \pm 2,97$
51410	11	$11,24 \pm 3,35$
52088	4	$3 \pm 1,73$
60705	3	$2,45 \pm 1,57$
64912	6	$4,97 \pm 2,22$
65260	1	$2,81 \pm 1,67$
65429	2	$1,65 \pm 1,28$

Dabei zeigt sich eine gute Verträglichkeit der Erwartungs- mit den Messwerten im Rahmen der nach der Poissonverteilung über $\sigma = \sqrt{\lambda}$ berechneten Standardabweichung.

Abbildungen 6.4 und 6.5 zeigen die Histogramme des gesamten Untergrunds für einen Zeitraum von einer Sekunde.

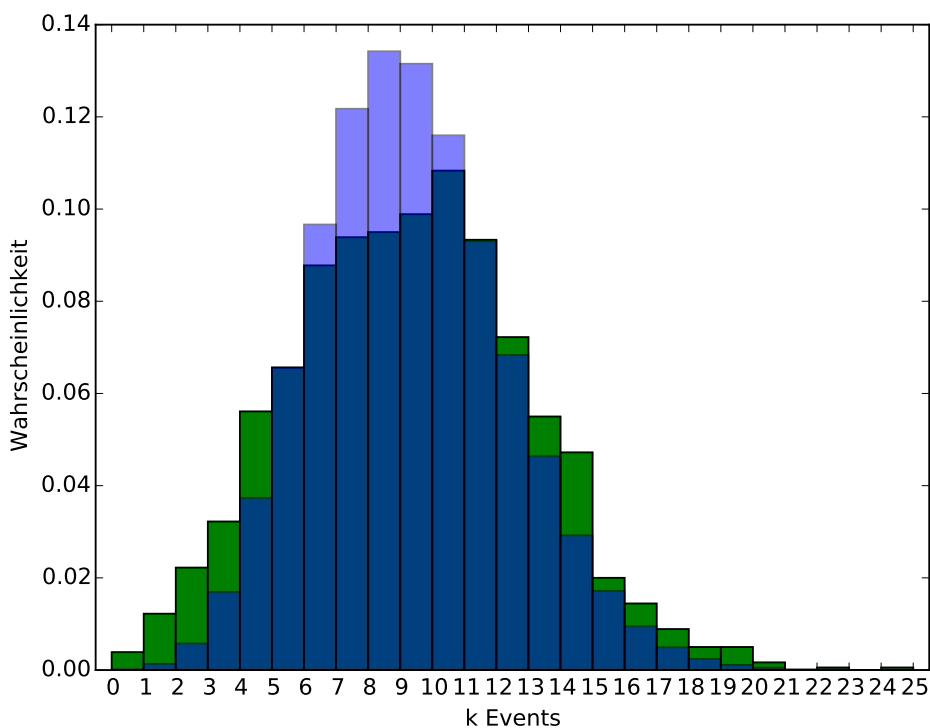


Abbildung 6.4: Das grüne Histogramm zeigt die Daten des Untergrunds für Run 37784. Das blaue Histogramm stellt den theoretischen Verlauf der Poissonverteilung anhand des aus den Daten bestimmten Erwartungswerts λ dar.

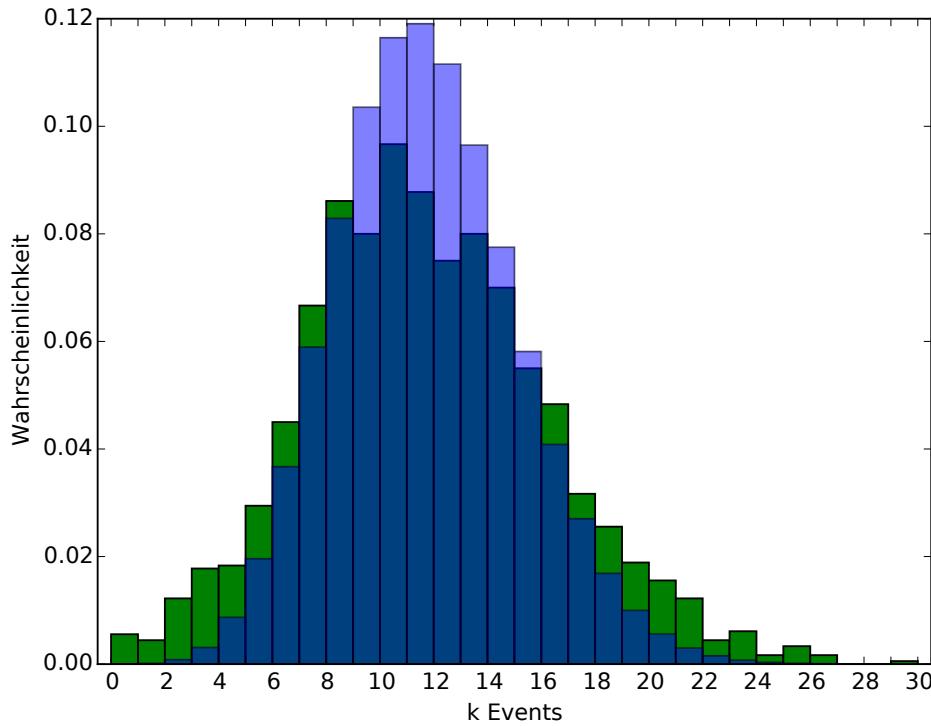


Abbildung 6.5: Das grüne Histogramm zeigt die Daten des Untergrunds für Run 51410. Das blaue Histogramm stellt den theoretischen Verlauf der Poissonverteilung anhand des aus den Daten bestimmten Erwartungswerts λ dar.

6.2.3 Rekonstruktion

Mittels des Analyse-Frameworks SeaTray kann aus den aufgezeichneten Daten der einzelnen Hydrofone, bei ausreichender Anzahl an Hydrofonen mit registrierten Signalen pro stattgefundenem Event, dessen Vertex rekonstruiert werden.

Nimmt man an, ein Event, das im untersuchten Zeitraum liegt, entspricht dem aus den optischen Daten rekonstruierten Event, so müssen die Daten der akustischen Rekonstruktion unter Berücksichtigung der Fehler näherungsweise mit den optischen übereinstimmen.

Tabelle 6.5 zeigt die Abweichungen zwischen den rekonstruierten akustischen und optischen Events. Darin aufgeführt ist der Abstand Δd der Vertices und die Differenz der azimuthalen und zenitalen Winkel der Impulsrichtungen.

Tabelle 6.5: Abweichungen zwischen den rekonstruierten Events aus optischen und akustischen Daten.

Run-ID	Δd [m]	$\Delta \varphi_{az}$ [$^\circ$]	$\Delta \varphi_{zen}$ [$^\circ$]
37784	311,4	76,6	38,1
51410	2406,5	63,9	39,5

Aufgrund der großen Unterschiede kann damit für jeden der Runs ausgeschlossen werden, dass es sich um das jeweilige gesuchte Event handelt.

6.3 Sparking Event

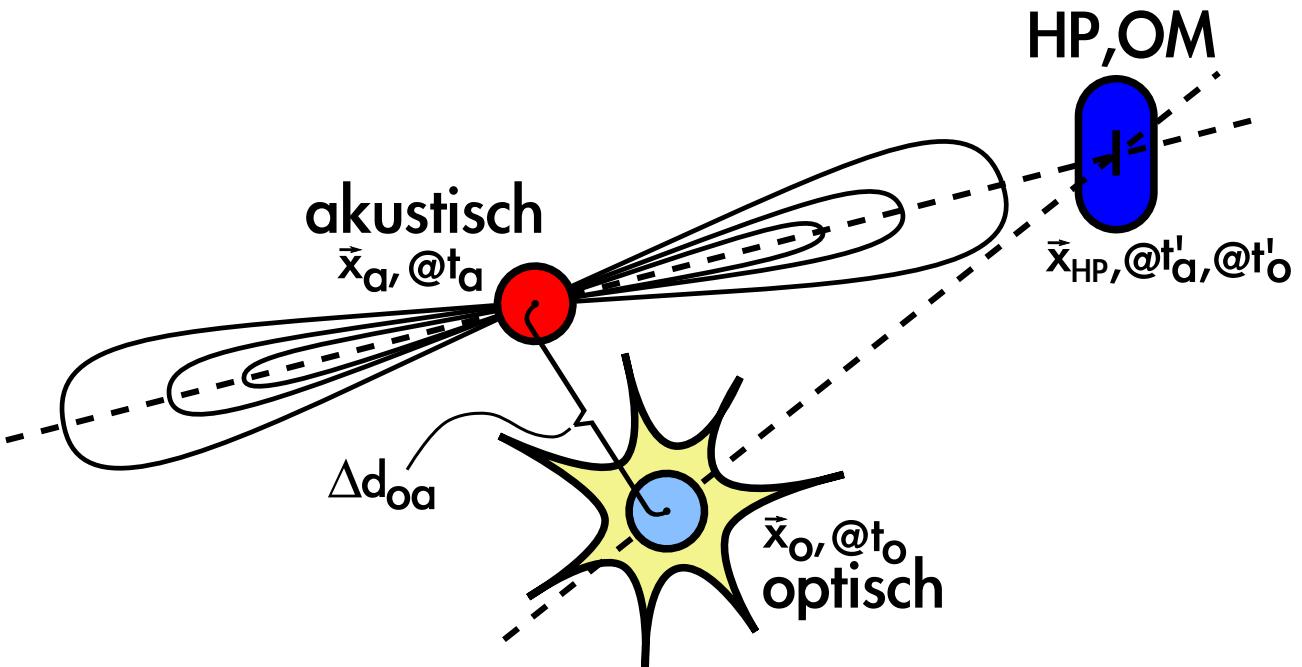


Abbildung 6.6: Ort und Zeitpunkt eines optischen und akustischen Ereignisses, deren Zusammenhang bestimmt werden soll.

Von Zeit zu Zeit kommt es vor, dass ein elektrischer Überschlag im Inneren eines Photomultipliern eines optischen Moduls auftritt, der einen hellen Lichtblitz zur Folge hat. Man spricht hierbei von einem *Sparking Event* [9]. Dieses kann von herkömmlichen Events unterschieden werden, indem man anhand der aufgezeichneten Daten über Rekonstruktion die Vertexposition bestimmt, die unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit innerhalb eines optischen Moduls liegen muss.

Es stellt sich die Frage, ob ein solches Event eine ausreichend starke Druckwelle mit sich bringt, um auch akustisch detektiert werden zu können. Im Folgenden wird daher die mögliche Korrelation zwischen optischer und akustischer Detektion untersucht.

Für die Geschwindigkeit des Schalls und des Lichts im Wasser gelten

$$v_a = 1540 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_o = 2,25 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Aus der akustischen Rekonstruktion erhält man die Position des Vertex \vec{x}_a , den Zeitpunkt t'_a , wann das Event zuerst detektiert wurde und das entsprechende Hydrofon, das dieses Ereignis aufgezeichnet hat. Dessen Position \vec{x}_{HP} ist bekannt, sodass sich der Abstand zwischen Hydrofon und Vertex ergibt zu

$$d_a = |\vec{x}_{HP} - \vec{x}_a|.$$

Für die tatsächliche Zeit, an dem das Event stattfand, folgt damit

$$t_a = t'_a - \frac{d_a}{v_a}. \quad (6.1)$$

Das optische Event trat zur Zeit t_o auf. Aufgrund der hohen Lichtgeschwindigkeit im Wasser gilt für den Messzeitpunkt

$$t'_o \approx t_o.$$

Geht man davon aus, dass das optische und akustische Event auf den gleichen Ursprung zurückzuführen sind, folgt

$$\vec{x}_o = \vec{x}_a,$$

also $\Delta d_{oa} = 0$. Es ist somit zu Prüfen, ob die Zeitpunkte, an denen die Events stattfanden, identisch sind, also ob der Zusammenhang

$$t_o = t_a$$

erfüllt ist.

Die rekonstruierte Position des akustischen Vertex und des detektierenden Hydrofons, sowie die Schallgeschwindigkeit im Wasser unterliegen einem Fehler, der nicht zu vernachlässigen ist.

Der Fehler auf die Position des Vertex wird nach den Daten aus [18] abgeschätzt. Durch Fit ergeben sich dabei die folgenden Funktionen

$$\begin{aligned}\delta r(x, y) &= \frac{x^2}{305,43^2} + \frac{y^2}{287,69^2} \\ \delta z(z) &= 1,76 + e^{0,0048z-3,4}.\end{aligned}$$

Die Koordinaten sind in Einheiten von Metern in die Gleichungen einzusetzen, wobei das Ergebnis die gleiche Einheit besitzt. Die Angaben sind stets relativ zum Ursprung \vec{O} , der in der x-y-Ebene im Detektorzentrum liegt und sich in z-Richtung am Meeresboden befindet. In Einheiten des verwendeten UTM-Systems, in dem auch die Koordinaten der rekonstruierten Vertices angegeben sind, besitzt er die Position

$$\vec{O} = \begin{pmatrix} 8239,370 \\ 2397,120 \\ -2452,560 \end{pmatrix}.$$

Die Funktionen sind in den Abbildungen 6.7 und 6.8 dargestellt. Es wurden Maximalwerte für den Fehler für δz von 7 m und für δr von 30 m gesetzt.

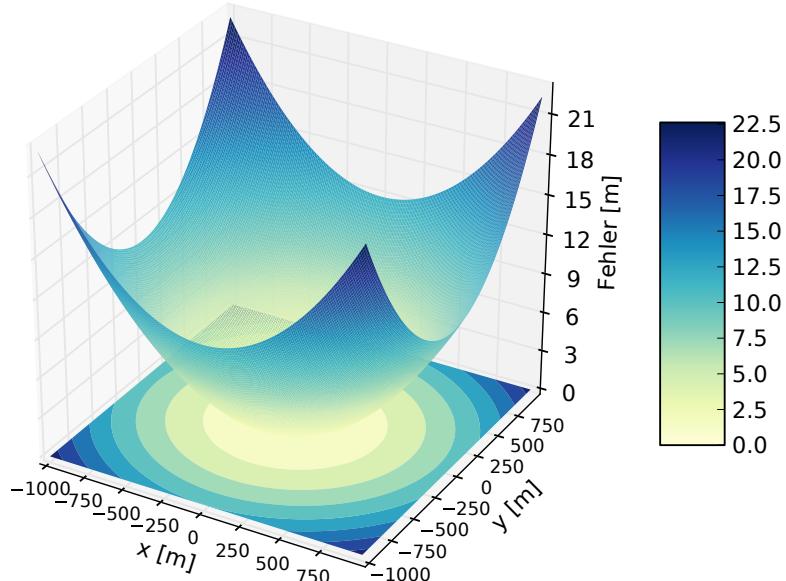


Abbildung 6.7: Fehler auf die Position in der x-y-Ebene eines rekonstruierten akustischen Vertex.

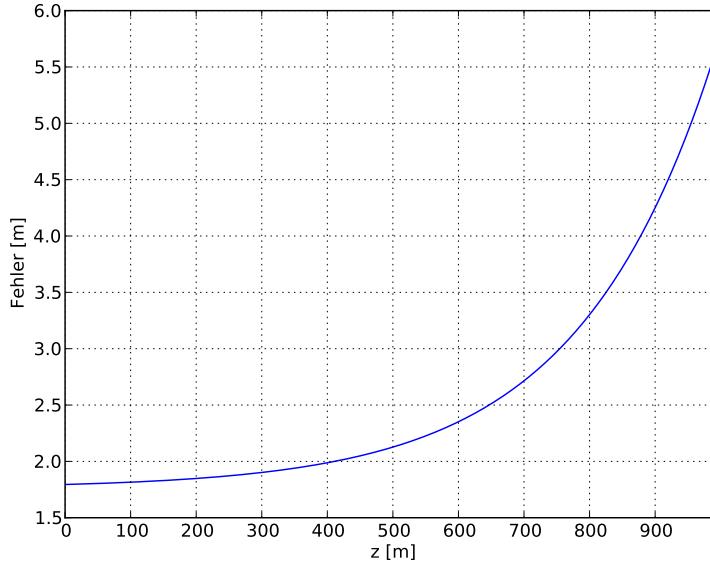


Abbildung 6.8: Fehler in z-Richtung für einen rekonstruierten akustischen Vertex.

Der Fehler für die Schallgeschwindigkeit im Wasser wurde mit einem Wert von

$$\delta v_a = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

angenommen. Die Abweichung der Hydrofonposition $\delta \vec{x}_{\text{HP}}$ wurde wie in Abschnitt 4.2.1 mit einem Meter festgelegt.

Abbildung 6.10 zeigt den Fehlerbereich eines Eventvertex, der die Form eines Zylinders annimmt. Der Fehler auf die Position eines Hydrofons ergibt sich als Kugel. Legt man eine Ebene durch Event- und Hydrofonvertex und projiziert die jeweiligen Fehlerkörper auf diese, ergibt sich eine zweidimensionale Darstellung der Fehler, die in Abbildung 6.9 zu sehen ist. Dies ist möglich, da der Zylinder entlang der Achsen ausgerichtet ist und rotationssymmetrisch um die z-Achse ist.

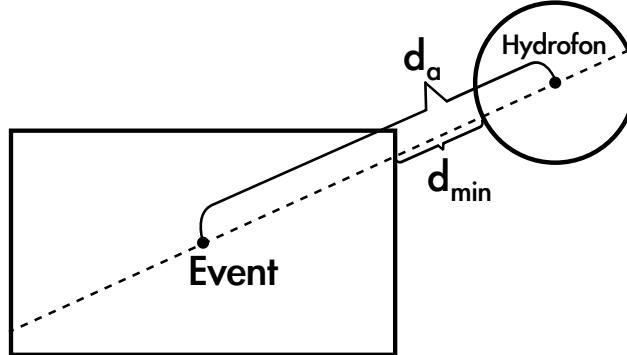


Abbildung 6.9: Projektion der Fehlerbereiche der Eventvertices eines Hydrofons und eines Events auf eine Ebene, die parallel zur z-Achse durch die beiden Punkte verläuft.

Es wird der kleinste Abstand d_{\min} der projizierten Fehlerformen bestimmt, der auf einer Linie zwischen den Vertices liegt. Der Fehler δd_a des Vertexabstands d_a wird über die Differenz

$$\delta d_a = d_a - d_{\min}$$

abgeschätzt.

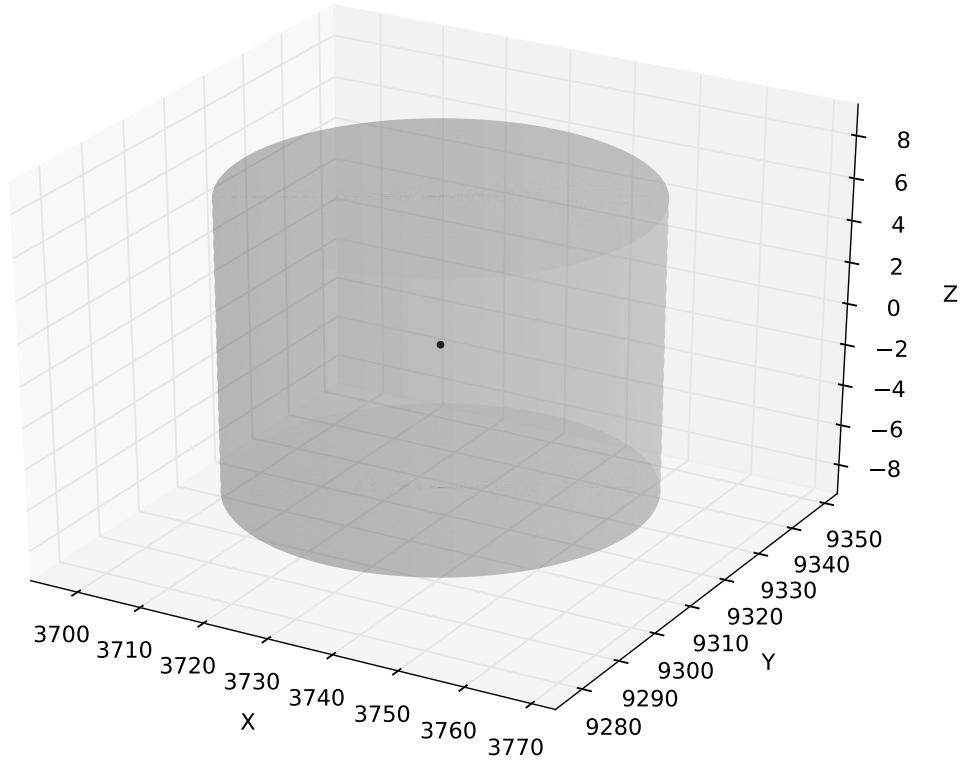


Abbildung 6.10: Zylinderförmiges Fehlervolumen eines rekonstruierten akustischen Eventvertex.

Über Anwenden von Fehlerfortpflanzung auf Gleichung 6.1 ergibt sich der Fehler auf die Zeit t_a zu

$$\begin{aligned}\delta t_a &= \sqrt{\left|\frac{\partial t_a}{\partial v_a}\right|^2 \delta v_a^2 + \left|\frac{\partial t_a}{\partial d_a}\right|^2 \delta d_a^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{d_a}{v_a^2} \delta v_a\right)^2 + \left(\frac{1}{v_a} \delta d_a\right)^2}.\end{aligned}$$

Existiert nun ein Event, für den der optische Zeitpunkt t_o innerhalb der Grenzen des rekonstruierten akustischen Eventzeitpunkts $t_a \pm \delta t_a$ liegt, so ist unter der Bedingung, dass sich der rekonstruierte akustische Vertex in der Nähe eines optischen Moduls befindet, die Wahrscheinlichkeit groß, dass akustisches und optisches Event identisch sind.

Ein Prüfen der Daten gibt dabei ein einziges Event wieder. Seine Daten sind in Tabelle 6.6 aufgelistet. Die Event-Zeitpunkte sind in UNIX-Zeit angegeben.

Tabelle 6.6: Abweichungen zwischen den rekonstruierten Events aus optischen und akustischen Daten.

t_o	t_a	Δt [s]	d_a [m]	δd_a [m]	δt_a [s]
1309937443,962	1309937443,934	-0,029	8543,773	31,803	0,042

Aufgrund der großen Distanz zu den Hydrofonen, können akustischer und optischer Vertex nicht übereinstimmen, da dieser zum einen im Inneren eines optischen Moduls liegen muss und da der Fehler auf die Position des akustischen Vertex fernab des Detektors so groß ist, dass dessen Lage nicht genau ausgemacht werden kann.

In dieser Arbeit wurde die Korrelation zwischen optischen und akustischen Messdaten untersucht. Aus einer Vielzahl an Detektor-Runs wurden die selektiert, deren Auswertung das größte Erfolgspotenzial versprachen. Dabei kamen verschiedene Verfahren zum Einsatz. Anhand der Lage der optischen Vertices und der Impulseinheitsrichtung des Neutrinos relativ zu den Hydrofonen des Detektors wurde für jeden Run entschieden, ob eine akustische Detektion wahrscheinlich erscheint. Durch die Definition, unter welcher Bedingung detektierte Signale als Event zu klassifizieren sind, wurde der Weg für eine statistische Auswertung bereitet. Anhand einer Simulation, die die Wahrscheinlichkeiten einer mehrfachen Detektion aufzeigte, wurde zur Verringerung des Effekts der Detektor in drei Bereiche unterteilt.

Unter Beachtung der Fehler aus der Vertexrekonstruktion und der Positionen der Hydrofone wurden Zeitbereiche definiert, innerhalb der nach dem vermuteten akustischen Event gesucht werden sollte. In der statistischen Auswertung wurde das Verhalten des Untergrunds in einer definierten *Region of Interest* untersucht und Verfahren bestimmt, mit deren Hilfe entschieden werden konnte, ob die dort vorliegenden Daten einer Poissonverteilung folgen. War dies der Fall, so wurde aus ihnen die Wahrscheinlichkeit ermittelt, innerhalb des Zeitraums, in dem nach dem akustischen Event gesucht wird, Untergrund zu detektieren.

Durch Kombination der Ergebnisse mehrerer Runs zeigte sich, dass kein optisches Event mit seinem vermuteten akustischen Pendant übereinstimmt.

Für ein einzelnes Sparking-Event wurde ebenfalls die mögliche Korrelation akustischer und optischer Signale untersucht. Gefunden wurde dabei ein akustisches Event, das eine große Distanz zum Detektor besitzt. Da das untersuchte optische Ereignis innerhalb eines optischen Moduls stattfand, konnte auch hier kein Zusammenhang zwischen optischem und akustischem Event ausgemacht werden.

In dieser Auswertung stand eine begrenzte Anzahl an Runs, die potenzielle akustisch-optisch korrelierte Kandidaten enthalten, zur Verfügung, von denen nach Selektion einige wenige übrig blieben. Unter einer Erhöhung der Anzahl könnte die Statistik verbessert werden und so möglicherweise doch ein Event akustisch detektiert werden.

A

Daten der optischen Events

Tabelle A.1: Rekonstruierte Vertices aus Messung mit dem optischen Detektor.

Run-ID	Datum	Zeitpunkt (UTC)	p_x	p_y	p_z	n_x	n_y	n_z	Δt_{int} [ns]	Energie [TeV]
26397	2007-03-02	06:37:25.374,251,900,0	8189.13083911	2344.44634097	-2429.1667163	-0.740323157818	0.329478113962	0.585974226753	4027.37319641	42.0627335015
27893	2007-05-26	19:43:24.161,035,500,0	8165.14103735	2558.36813682	-2224.71443152	0.642160836208	-0.753295092695	0.142042119677	4335.97794097	16.3236897746
28446	2007-06-22	11:45:13.462,626,100,0	8250.82266587	2477.37812694	-2136.0260458	0.0233320754661	-0.0478427706339	0.998582336892	5198.97014498	2.64783664722
28722	2007-07-13	03:29:22.366,902,500,0	8202.98946313	2347.63047322	-2201.9070283	0.416191402014	0.865967722159	0.277280762168	4382.3559598	39.1447352197
29551	2007-09-19	19:35:40.987,068,800,0	8326.12591292	2418.81058974	-2314.32279356	-0.975018314109	-0.155285269733	0.158826232583	4519.09785788	2.111614421
30162	2007-11-02	07:27:23.817,246,900,0	8266.21743135	2352.5640762	-2158.25989683	-0.313393959908	0.851984368838	0.419412519067	4632.16044895	1.55438002245
30336	2007-11-17	14:47:25.061,580,200,0	8214.79073745	2437.48082638	-2219.29513038	0.67220865192	0.649384300085	0.35557778205	4650.6067369	1.10684989002
30592	2007-12-10	13:39:58.454,921,800,0	8247.16404476	2464.24555583	-2169.34975033	0.108436497912	-0.940884618694	0.32090132475	5442.90575016	1.92778458717
31275	2008-01-12	18:18:26.178,464,700,0	8165.59869443	2409.48085168	-2335.6694627	-0.514207222109	-0.802797935275	0.301838380343	4561.17460626	1.5668846863
32283	2008-02-24	13:33:04.164,193,500,0	8252.20390926	2342.25274233	-2259.62449138	-0.244560794084	-0.672386951189	0.698631380534	4693.26489967	3.0133733799
33713	2008-04-23	03:48:40.597,091,900,0	8149.06167102	2421.87751219	-2282.18715045	0.175720734582	0.302936215499	0.93667063196	5018.70603101	1.48256673989
34796	2008-06-12	18:08:08.320,676,200,0	8245.4909959	2324.8770924	-2254.0609494	-0.114841211688	-0.946619293177	0.301203270039	5032.45201125	1.75896730994
35336	2008-09-13	11:48:30.186,350,400,0	8217.35925511	2357.31114324	-2158.72419418	-0.479914427487	0.855268453071	0.195443125925	5116.99555532	1.02437788172
35933	2008-10-02	21:20:49.048,241,400,0	8217.45696324	2408.0673942	-2328.64558994	-0.532875629622	0.284128603291	0.797066183041	5245.71698069	1.05530076055
36475	2008-10-18	02:45:03.287,585,400,0	8219.57415429	2454.82115621	-2397.92049146	-0.659591803815	-0.530752015444	0.532203861732	4775.34484646	4.65643152184
36552	2008-10-21	23:33:15.522,324,000,0	8200.54895364	2399.15368178	-2255.64789815	-0.439870775037	-0.234109045337	0.86701018227	5220.48688911	1.58930422837
37783	2008-12-12	08:40:19.981,693,900,0	8160.91015048	2327.78584792	-2320.82262606	0.541923851341	-0.755846809349	0.367442703214	5075.71850145	4.68748418291
39104	2009-02-14	17:29:01.161,827,000,0	8181.26829663	2296.44492774	-2391.19768112	-0.37776947013	0.804431368785	0.458454360163	5127.50585047	2.75947099395
39122	2009-02-15	18:21:55.010,095,500,0	8337.19779844	2294.19861666	-2307.56965676	-0.865333249091	0.202978058539	0.458255688202	5137.74681474	8.39121950663
39331	2009-02-25	13:39:54.401,000,100,0	8102.02648611	2409.32731301	-2427.75201152	0.953344590096	-0.16390102844	0.253516361228	4934.17935003	7.38344097853
40119	2009-04-13	08:02:30.952,763,000,0	8249.46427715	2490.55629401	-2334.30890393	-0.548748174244	-0.802488318975	0.234281751686	5484.80668054	2.15781659685
42119	2009-07-25	19:47:57.504,268,700,0	8237.10552792	2320.54778216	-2153.66033425	0.897284818982	0.401835402243	0.182779274343	5097.49100218	6.04858725983
43639	2009-10-05	06:08:10.571,350,300,0	8392.54928745	2316.14870199	-2383.90924684	-0.766570759513	-0.0679540611835	0.638554239065	4452.5804959	87.5385845913
45946	2010-01-20	08:21:30.877,631,900,0	8237.97332156	2454.87589149	-2187.89798779	-0.571879996416	-0.442929378654	0.69048304485	5687.28523634	1.1287712932
46009	2010-01-23	01:54:02.716,635,900,0	8236.9368857	2432.64460768	-2150.24869435	-0.231906341068	-0.744980130933	0.625479059192	5605.93602829	0.850107033703
46852	2010-02-25	19:44:37.808,609,400,0	8180.2325063	2332.93086438	-2467.58047248	0.121594364601	-0.583026795532	0.803302288176	4892.99892876	39.3057989758
47679	2010-03-30	16:42:52.957,879,900,0	8186.96214692	2483.30445325	-2404.54312075	-0.226552076014	0.483801478809	0.84534625211	5481.5298846	9.0985297662
47838	2010-04-06	03:50:24.203,136,200,0	8215.20061021	2277.52958215	-2288.3742832	-0.419308935735	0.714534887101	0.560017777868	4978.463981	0.807797033755

45	49425	2010-06-19	10:41:21.487,006,300,0	8142.92881745	2443.14529534	-2406.35553431	0.549203592481	-0.813939213715	0.18941586624	4973.87400472	21.3977338675
	49518	2010-06-22	11:44:08.287,100,800,0	8244.00036232	2388.82678169	-2151.34789427	-0.811935136822	0.523250488511	0.258786127655	5253.40550962	1.00049237631
	50675	2010-07-29	03:20:54.933,359,600,0	8112.1101336	2375.64364031	-2325.87364908	0.506233758446	0.48440054067	0.713500874567	5001.87743808	6.66521937305
	51411	2010-08-23	00:46:59.861,310,200,0	8286.10020114	2348.95299074	-2351.66558586	-0.836175181954	-0.36437529272	0.40992890986	5234.10459712	2.53625344351
	51879	2010-09-10	11:27:17.193,282,600,0	8244.95992559	2520.62507817	-2381.70025922	0.827163919134	-0.266942257505	0.494511559057	4682.31967342	14.9966437507
	51991	2010-09-15	06:43:18.856,166,700,0	8278.7068155	2414.51468743	-2188.44761293	0.531519988481	-0.844070479071	0.0709332658661	4992.87123255	5.42688421128
	52087	2010-09-20	06:03:47.412,216,400,0	8240.65285296	2375.3764457	-2310.49519392	-0.327834441894	0.0835473614878	0.941033696047	4973.05089716	0.34816951224
	53119	2010-11-14	20:33:56.210,781,300,0	8133.25291668	2375.9761234	-2167.69050515	0.219175361202	-0.53099360903	0.818540132315	5222.61311641	1.18918510744
	54326	2011-01-04	10:05:20.625,992,400,0	8313.12302345	2441.46242093	-2267.38540989	-0.900852501151	-0.266772858371	0.342486515366	5215.20283106	1.20206686929
	55894	2011-03-11	01:47:39.425,979,700,0	8268.43008975	2453.61859822	-2356.50725702	-0.318138341501	-0.853404440619	0.412902962448	4792.98658158	2.90668069142
	58045	2011-06-14	04:55:47.232,163,500,0	8148.57661691	2365.40365889	-2295.55840082	0.336425272846	-0.202390864968	0.919704285935	5138.55775037	1.11731773938
	58498	2011-07-07	06:08:26.720,632,600,0	8225.79521162	2510.05229447	-2273.34181763	-0.213771511216	-0.935086286009	0.282693082175	5334.01624985	1.35176726416
	58686	2011-07-16	15:35:50.112,953,400,0	8285.60664529	2413.83513255	-2138.68999485	-0.243629955417	-0.925831501885	0.288929878935	5332.55136468	0.818044631981
	58812	2011-07-24	03:54:23.661,863,200,0	8269.00973387	2379.61581235	-2347.64908255	0.464334470048	-0.863849436454	0.195339834809	4908.02675514	1.10894720254
	58892	2011-08-04	15:44:58.281,796,000,0	8180.44220433	2385.71665335	-2138.79779826	-0.273701769736	0.351471604304	0.895296069807	4848.40587074	0.521030211863
	59425	2011-09-01	07:23:19.258,309,400,0	8153.37279307	2396.00349469	-2304.21069226	0.300472875518	-0.938387689146	0.17071788406	4768.81487077	0.693150633597
	59692	2011-09-15	08:33:32.525,104,600,0	8350.63718394	2310.68758898	-2318.68873432	-0.981140454346	0.123140309398	0.148996218229	4983.92475768	5.91306112403
	59712	2011-09-16	06:00:13.665,175,800,0	8322.14390907	2393.76464973	-2372.15376755	-0.902405302349	-0.391159441575	0.18071790603	5260.10608354	1.43490065599
	59797	2011-09-19	01:20:06.114,046,100,0	8163.7612738	2407.63487814	-2372.33674461	0.583904896827	0.808739056003	0.0706838790521	5206.20863163	4.81754534976
	60226	2011-10-12	02:13:12.117,950,100,0	8272.86162781	2345.28975759	-2345.5684834	-0.341511251201	0.612361057411	0.713010519326	4896.27959863	1.45030515923
	60704	2011-11-02	10:54:15.995,345,800,0	8204.46249471	2314.46670947	-2092.30588607	0.00823836995244	0.727818259833	0.685720577141	6092.30019435	1.67548452886
	60861	2011-11-09	14:24:49.246,210,100,0	8261.25940174	2432.20196498	-2253.34272807	0.845386403672	-0.190625122047	0.49898285675	4997.63017837	2.8449093622
	61975	2012-01-04	17:15:17.422,624,900,0	8244.60102255	2421.76594643	-2139.57370558	0.568343414214	0.812701728453	0.128458803078	5971.73059661	1.46001532519
	62139	2012-01-13	04:49:07.493,130,800,0	8335.49900599	2378.69302719	-2172.88426588	-0.626938821158	-0.752097178655	0.203217982433	5599.98131613	2.7164932497
	62228	2012-01-16	16:19:38.560,409,200,0	8154.23061116	2385.69000403	-2127.55454938	0.93244499889	-0.343370092901	0.112442444592	4935.0335632	7.14741181558
	62834	2012-02-19	17:11:50.076,114,300,0	8145.04034149	2426.40487689	-2452.94526316	0.873667283194	0.097744785983	0.476604065331	4981.95605954	28.0580894266
	63013	2012-02-29	01:07:46.970,224,400,0	8337.26032489	2443.13091819	-2225.78919227	0.0471050927202	-0.685243244617	0.726789382109	4545.24633463	7.77762248418
	64914	2012-06-19	05:00:03.405,128,000,0	8170.71266779	2430.45151489	-2360.4479824	0.927749542964	0.334811821265	0.164869129531	5287.56174295	4.51903950679
	65259	2012-07-04	21:42:13.506,463,500,0	8173.71177733	2299.51478086	-2286.02793747	0.447145250713	0.887528884237	0.11114676968	5833.28772729	1.57623635057
	65434	2012-07-12	16:09:07.418,074,000,0	8229.71701031	2368.58029873	-2128.4516528	0.312701361497	0.848840757976	0.426247845879	6068.37275128	0.326673364318
	66772	2012-09-19	02:56:27.662,006,900,0	8315.39098163	2394.83595575	-2366.99305288	-0.369215160266	-0.717974729907	0.590078344497	4639.82260165	1.83376733968
	67723	2012-11-06	07:31:26.246,107,600,0	8185.72896439	2391.41891481	-2417.78618596	-0.0664255190469	0.0500412253356	0.996535762623	4974.51511674	2.33201383903

Literaturverzeichnis

- [1] Robert Lahmann. Ultra-High-Energy Neutrinos and their Acoustic Detection in the Sea. 2011. Habilitationsarbeit. p. 7f, 83.
- [2] Florian Folger. Reconstruction of neutrino-induced Hadronic Showers with the ANTARES Neutrino Telescope. 2009. ECAP-2009-002. Diplomarbeit.
- [3] G.A. Askarian, B.A. Dolgoshein, A.N. Kalinovsky, and N.V. Mokhov. Acoustic detection of high energy particle showers in water. *Nuclear Instruments and Methods*, 164(2), 1979. p. 267ff. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X79902441>.
- [4] S Bevan., S Danaher., J Perkin., S Ralph., C Rhodes., L Thompson., T Sloan., and D Waters. Simulation of Ultra High Energy Neutrino Interactions in Ice and Water. *Astropart. Phys.*, 28:366–379, 2007. p. 22, 27. [arXiv:0704.1025](https://arxiv.org/abs/0704.1025), doi:10.1016/j.astropartphys.2007.08.001.
- [5] R. Lahmann. Status and first results of the acoustic detection test system AMADEUS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 604, June 2009. p. 2. [arXiv:0901.0321](https://arxiv.org/abs/0901.0321), doi:10.1016/j.nima.2009.03.058.
- [6] J.A. Aguilar, I. Al Samarai, A. Albert, et al. A fast algorithm for muon track reconstruction and its application to the ANTARES neutrino telescope. *Astroparticle Physics*, 34:652–662, April 2011. p. 652ff. [arXiv:1105.4116](https://arxiv.org/abs/1105.4116), doi:10.1016/j.astropartphys.2011.01.003.
- [7] Erlangen Acoustic Detection Group. The amadeus project. http://www.ecap.nat.uni-erlangen.de/acoustics/research/amadeus_project/index.shtml.
- [8] J. A. Aguilar, I. Al Samarai, A. Albert, et al. AMADEUS – The acoustic neutrino detection test system of the ANTARES deep-sea neutrino telescope. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 626:128–143, 2011. [arXiv:1009.4179](https://arxiv.org/abs/1009.4179), doi:10.1016/j.nima.2010.09.053.
- [9] Florian Folger. Search for a diffuse cosmic neutrino flux using shower events in the antares neutrino telescope. 2014. ECAP-2014-048. Doktorarbeit. p. 144ff.
- [10] Christoph Sieger. Status of AMADEUS - ANTARES Collaboration Meeting. 2012.
- [11] R. Lahmann. Specifications of the Acoustic ADC and Data Processing Board (AcouADC-Board). p. 24. http://antares.in2p3.fr/internal/decii-km2/documents/3INS_07_02A.pdf.
- [12] Claudio Kopper. A software framework for KM3NeT. *Nucl. Instrum. Meth.*, A602, 2009. p. 107ff. doi:10.1016/j.nima.2008.12.047.
- [13] T.R. De Young. Icetray: a software framework for icecube. *CHEP 2004 Proceedings*, 2005. p. 463.
- [14] ANTARES Collaboration. ANTARES Home Page. <http://antares.in2p3.fr>.

- [15] Bernhard Scherl. Untersuchungen zur Machbarkeit eines optisch-akustischen Neutrino-nachweises mit ANTARES. 2011. Bachelorarbeit. p. 12f.
- [16] R. Lahmann. private Kommunikation. 2015.
- [17] William T Eadie, Daniel Drijard, Frederick E James, Matts Roos, and Bernard Sadoulet. Statistical methods in experimental physics. 2006. p. 135ff.
- [18] Carsten Richardt. Acoustic particle detection – Direction and source location reconstruction techniques. 2010. Doktorarbeit. p. 69ff.

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Erlangen, 11. August 2015

Sebastian Schmidt