

Untersuchungen zur Machbarkeit eines optisch-akustischen Neutrinonachweises mit ANTARES

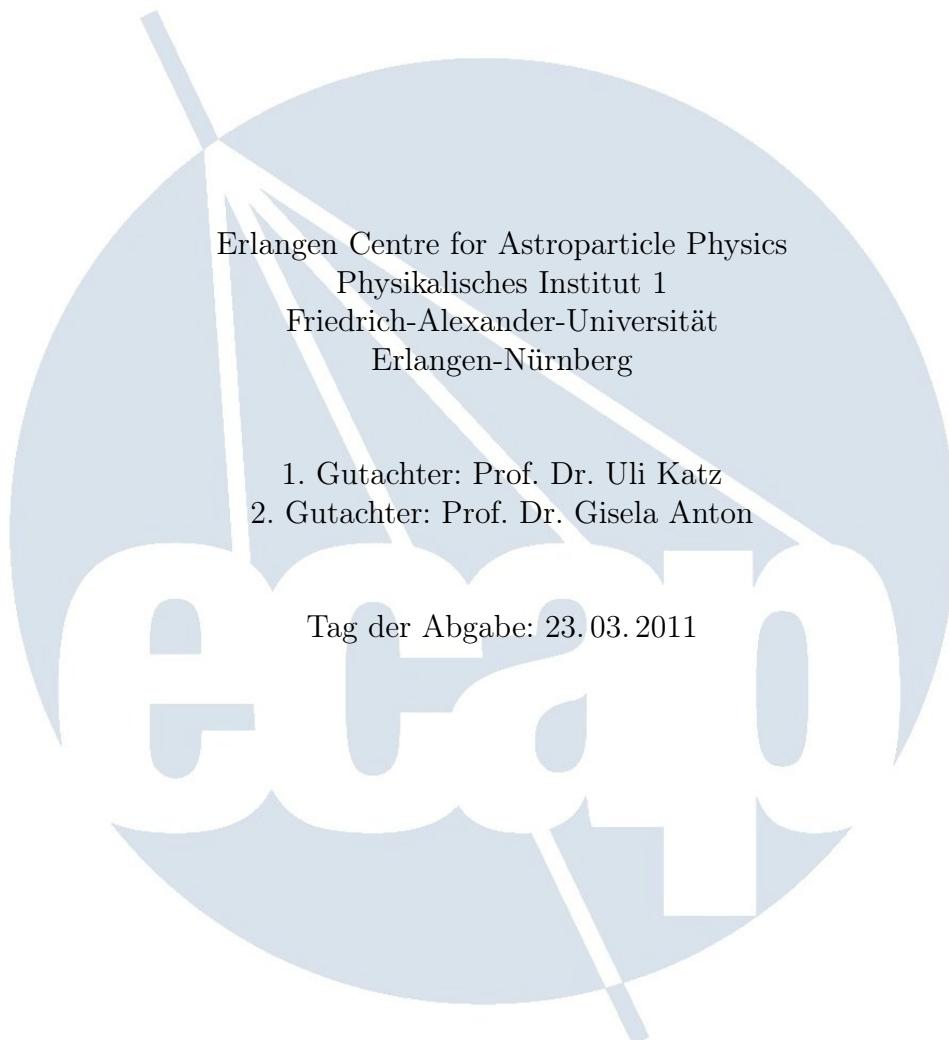
Bachelorarbeit

vorgelegt von
Bernhard Scherl

Erlangen Centre for Astroparticle Physics
Physikalisches Institut 1
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

1. Gutachter: Prof. Dr. Uli Katz
2. Gutachter: Prof. Dr. Gisela Anton

Tag der Abgabe: 23.03.2011



Inhaltsverzeichnis

1 Vorwort	3
2 Physikalische Grundlagen und Detektordesign	4
2.1 Neutrinoreaktionen	4
2.2 Detektionsmethoden	4
2.2.1 Cherenkovlicht	4
2.2.2 Akustische Druckwellen	6
2.3 ANTARES	7
2.3.1 Optischer Aufbau	9
2.3.2 Akustischer Aufbau	9
3 Akustischer Nachweis	12
3.1 Simulationsmethode	12
3.1.1 Detektionsbedingung	12
3.1.2 Ereignissimulation	13
3.2 Ergebnisse	14
3.2.1 Räumliche Verteilung	14
3.2.2 Effektives Volumen	17
4 Optischer Nachweis	20
4.1 Simulationsmethode	20
4.2 Ergebnisse	21
4.2.1 Räumliche Verteilung	21
4.2.2 Effektives Volumen	21
5 Zusammenfassung und Ausblick	26

Kapitel 1

Vorwort

Jahrtausendelang wurde der Himmel mittels optischer Instrumente beobachtet. Dabei erhielt man jedoch nur Informationen, die durch Photonen übermittelt wurden. Mit Hilfe der modernen Technik und physikalischen Forschung ist es mittlerweile auch möglich, andere Teilchen aus dem Weltall zu beobachten. Eine Art von Teilchen, durch deren Beobachtung man sich neue Erkenntnisse erhofft, sind hochenergetische Neutrinos (mit Energien von mehr als 10^{18} eV). Diese können nicht direkt detektiert werden, da sie nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen, und werden somit indirekt durch ihre Reaktionsprodukte nachgewiesen. Auch benötigt man aufgrund des niedrigen Wirkungsquerschnittes zur Detektion sehr große Volumina.

Diese Tatsachen führten zur Errichtung und Planung riesiger Detektoren wie ANTARES¹, IceCube² oder KM3Net³. Diese machen sich zum optischen Nachweis von Neutrinos das Cherenkovlicht ihrer Reaktionsprodukte zu nutze. Dabei senden geladene Teilchen, die sich schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Medium (bei diesen Detektoren Wasser oder Eis) bewegen, Licht aus, das mit Photomultipliern detektiert wird.

Ein vergleichsweise junges Gebiet ist die akustische Neutrinodetektion. Für Untersuchungen auf diesem Gebiet wurde der AMADEUS-Detektor⁴ in ANTARES installiert. Dabei werden die von bei Reaktionen eines Neutrinos entstehenden Teilchenschauern ausgehende Druckwellen (durch Energiedisposition) durch Hydrophone (Unterwassermikrophone) detektiert. Man erhofft sich aus dem Betrieb Erkenntnisse, die zum Bau zukünftiger akustischer Detektoren genutzt werden können.

In der vorliegenden Arbeit werden mittels Computersimulation verschiedene Eigenschaften des akustischen Detektors untersucht.

¹<http://antares.in2p3.fr>

²<http://icecube.wisc.edu>

³<http://www.km3net.org>

⁴<http://www.acoustics.physik.uni-erlangen.de>

Kapitel 2

Physikalische Grundlagen und Detektordesign

2.1 Neutrinoreaktionen

Neutrinos und Antineutrinos gibt es in je drei Flavours:

- Elektron ν_e bzw. $\overline{\nu}_e$
- Myon ν_μ bzw. $\overline{\nu}_\mu$
- Tau ν_τ bzw. $\overline{\nu}_\tau$

Diese können nun im Wasser mit einem Nukleon N wie folgt reagieren:



Analoges ergibt sich für Antineutrinos. Somit erhalten wir das geladene Lepton l^- (das je nach Neutrinoflavour ein Elektron, Myon oder Tau sein kann) und weitere Reaktionsprodukte X . Der optische Nachweis in ANTARES ist auf ν_μ und die daraus entstehenden Myonen ausgerichtet. Die Leptonen werden jedoch in dieser Arbeit der Einfachheit halber nicht betrachtet (eine genaue Begründung dafür folgt später).

Von weit größerer Bedeutung für diese Arbeit sind die elektromagnetischen und hadronischen Schauer, die am Interaktionspunkt mit einigen Metern Länge entstehen. Diese haben den Vorteil, dass sie viel Energie in einem relativ kleinen Volumen deponieren und somit leichter zu detektieren sind. Sie bestehen aus vielen kurzen Spuren, wodurch wir mehr Cherenkov-Strahlung in einer Art „hellen Punktequelle“ haben. Auch sind sie gleichzeitig Ursprung des optischen als auch akustischen Signals, was für uns sehr nützlich ist, da wir so nur einen Signalursprung berücksichtigen müssen. Auf diese Schauer soll in dieser Arbeit näher eingegangen werden, wobei wir uns im Folgenden zwei Detektionsmethoden genauer ansehen wollen.

2.2 Detektionsmethoden

2.2.1 Cherenkovlicht

Man kann sich bei geladenen Teilchen, die sich schneller als die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium bewegen, den Cherenkoveffekt zunutze machen. Dieser tritt zwar bei den ungeladenen Neutrinos nicht auf, bei den Reaktionsprodukten selbiger jedoch schon. Das Cherenkovlicht wird unter dem Winkel

$$\vartheta_C \approx \arccos \frac{1}{n} \quad (2.2)$$

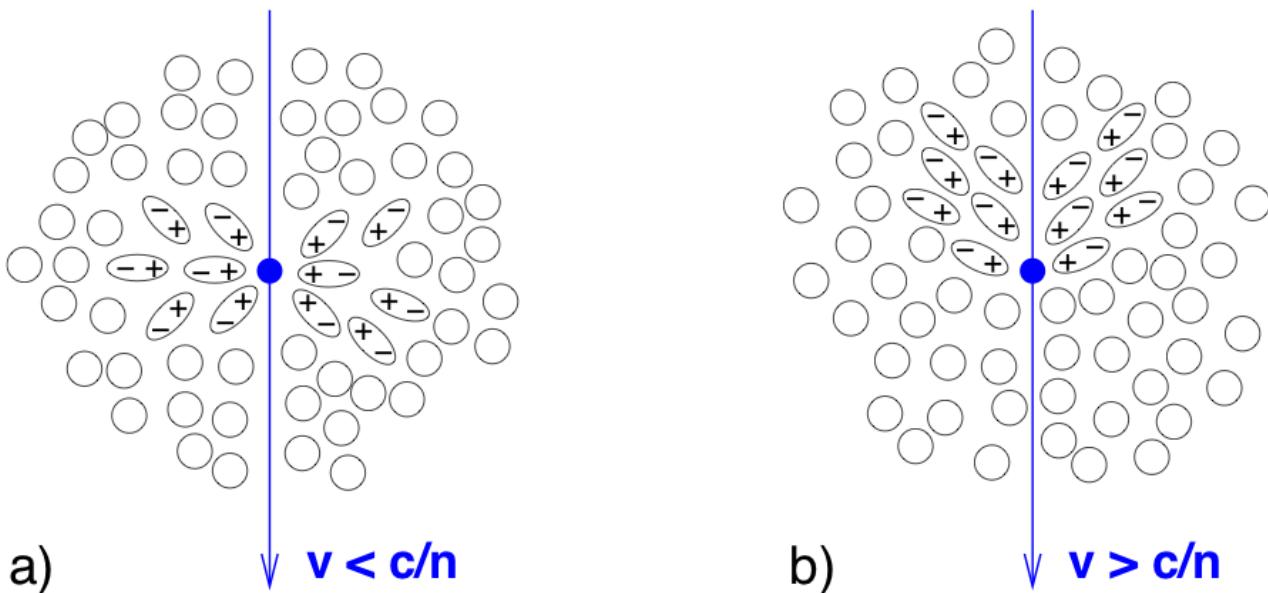


Abbildung 2.1: Darstellung der Ausrichtung der polarisierten Atome entlang der Flugbahn eines Teilchens (a) unter Lichtgeschwindigkeit (b) über Lichtgeschwindigkeit (Hartmann 2006, S. 20)

mit dem Brechungsindex n des Wassers abgestrahlt.

Zustande kommt dieser Effekt durch die Polarisation der Atome entlang der Teilchenflugbahn. Diese werden somit zu Dipolen und richten sich bei hohen Geschwindigkeiten (größer der Lichtgeschwindigkeit) nicht mehr radialsymmetrisch aus (siehe Abbildung 2.1) sondern emittieren Licht in einem Cherenkovkegel unter dem Winkel ϑ_C . Dieses Licht kann man dann detektieren und anhand der ankommenden Photonenzahl (an mehreren Orten gemessen) und der zeitlichen Abfolge der Ankunft auf Richtung, Entfernung und Energie des Schauers rückschließen.

In unserem Fall (also im Mittelmeer) beträgt ϑ_C etwa 42° . Real wird dieser Winkel jedoch bei hadronischen Schauern aufgrund der vielen Spuren „verschmiert“. Die Anzahl der Photonen, die ein Teilchenschauer emittiert, kann nach Hartmann (2006) für niedrigere als die hier betrachteten Energien ($560 \text{ GeV} \lesssim E_{sh} \lesssim 56 \text{ PeV}$) gemäß der folgenden Verteilung parametrisiert werden:

$$D(\vartheta, E_{sh}) = p \cdot \left(\frac{p_0}{\sqrt{2\pi}p_1} \cdot e^{-(\vartheta-p_2)^2/(2p_1^2)} + \frac{p_3}{\sqrt{2\pi}p_4} \cdot e^{-(\vartheta-p_5)^2/(2p_4^2)} + \frac{p_6}{2\pi} \frac{p_7}{(\vartheta - p_8)^2 + \frac{p_7^2}{4}} \right) \quad (2.3)$$

Dabei ist ϑ der Winkel zwischen der Schauerrichtung (die man hier gut mit der ursprünglichen Neutrino-Flugrichtung nähern kann) und dem Vektor zwischen Vertex (also dem Punkt an dem das Neutrino reagiert und von dem der Schauer ausgeht) und unserem Beobachtungspunkt (gemessen in Grad). E_{sh} ist die Schauerenergie in GeV und p_0 bis p_8 wurden (ebenfalls in Hartmann (2006), S. 83) durch Fits an eine Simulation wie folgt bestimmt:

$$p_0 = 0.321 + 0.0150 \cdot \log_{10}(E_{sh}) \quad (2.4)$$

$$p_1 = 14.304 + 0.336 \cdot \log_{10}(E_{sh}) \quad (2.5)$$

$$p_2 = 40.791 + 0.660 \cdot \log_{10}(E_{sh}) \quad (2.6)$$

$$p_3 = 0.0779 - 0.0137 \cdot \log_{10}(E_{sh}) + 0.0055 \cdot (\log_{10}(E_{sh}))^2 \quad (2.7)$$

$$p_4 = 15.150 + 2.843 \cdot \log_{10}(E_{sh}) \quad (2.8)$$

$$p_5 = 78.694 - 0.0367 \cdot \log_{10}(E_{sh}) \quad (2.9)$$

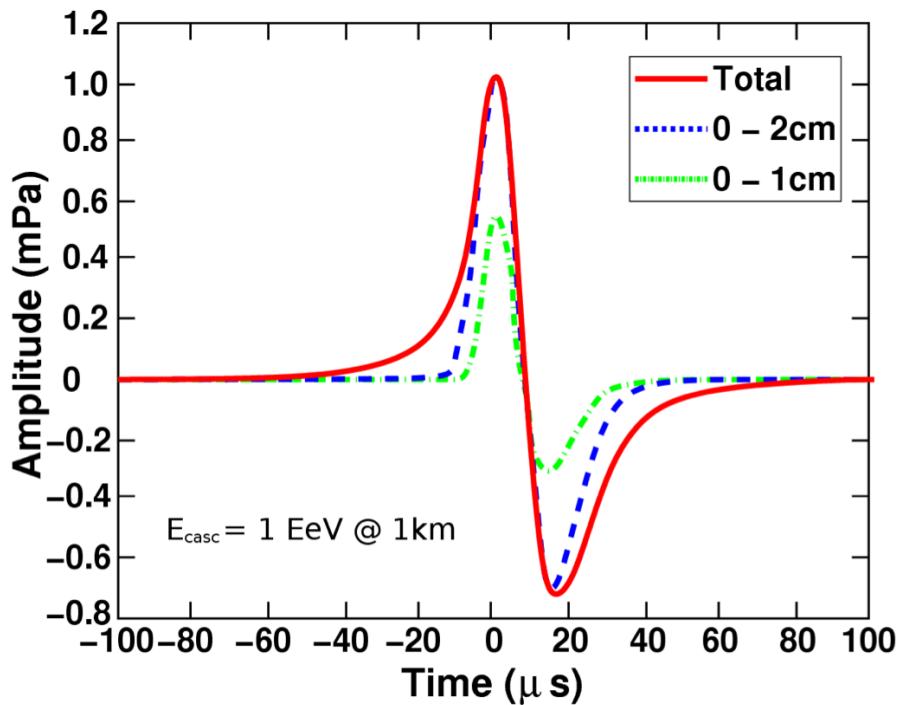


Abbildung 2.2: Simulierter bipolarer akustischer Puls einer hadronischen 10^{18} eV -Kaskade in 1km Entfernung. Etwa der halbe Druckpuls wird innerhalb von 1cm Radius um die Kaskade erzeugt (grün), innerhalb von nur 2cm Radius (blau) wird jedoch fast die gesamte Energie die für die endgültige Form (rot) verantwortlich ist deponiert (Lahmann 2009, S. 2) - Grafik adaptiert von ACoRNE Collaboration (2007)

$$p_6 = 0.688 - 0.0506 \cdot \log_{10}(E_{sh}) \quad (2.10)$$

$$p_7 = 6.181 - 0.100 \cdot \log_{10}(E_{sh}) \quad (2.11)$$

$$p_8 = 42.144 + 0.0677 \cdot \log_{10}(E_{sh}) \quad (2.12)$$

Der Parameter p als Normierungsfaktor ergibt sich durch Integration zu

$$p = (p_0 + p_3 + p_6/\pi \cdot (\arctan((360^\circ - 2p_8)/p_7) - \arctan(-2p_8/p_7)))^{-1} \quad (2.13)$$

Da bisher keine entsprechenden Parametrisierungen für ultrahochenergetische Neutrinos ($E \geq 10^{18} \text{ GeV}$) bekannt sind, wurde für diese Arbeit die eben zitierte Parametrisierung verwendet. Nun wären eigentlich noch die Cherenkovphotonen aus dem erzeugten Lepton zu betrachten. Die Zahl der daraus resultierenden Photonen ist aufgrund der großen räumlichen Ausdehnung der Spur bei Myonen aber so gering, dass diese hier vernachlässigt werden kann und somit nicht berücksichtigt wird. Ähnliche Argumente treffen für ultrahochenergetische Taus und Elektronen bzw. elektromagnetische Schauer zu. Dies kann leicht anhand der Angaben in Leo (1994) überprüft werden.

2.2.2 Akustische Druckwellen

Nach Askariyan u. a. (1979) führt Energie, die in einer Teilchenkaskade deponiert wird, zu einer lokalen Erhitzung des Mediums. Dadurch dehnt sich das Medium nahezu instantan aus. Es wird eine Druck- bzw. Schallwelle erzeugt, die sich im Medium ausbreitet. Von der Form her handelt es sich dabei um einen bipolaren Puls (siehe Abbildung 2.2).

Die Schauerenergie wird nur in einem kleinen Winkelbereich senkrecht zur Schauerrichtung, in Form eben dieser Druckwelle deponiert. Die Ausbreitung dieser Druckwelle ergibt dann eine

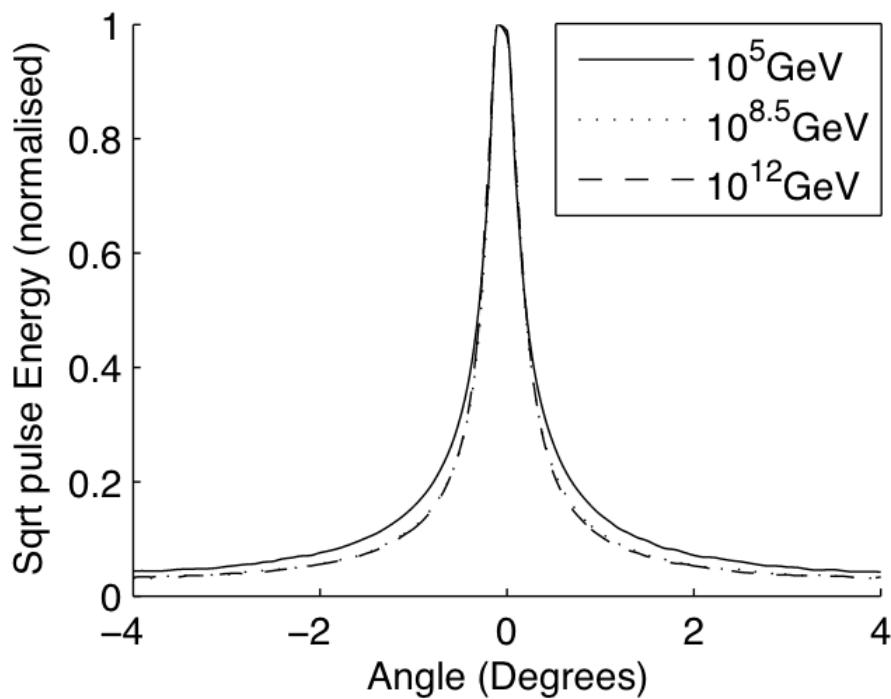


Abbildung 2.3: Wurzel der Energieverteilung für verschiedene Pulsenergiewerte (ACoRNE Collaboration 2009, S. 27)

flache Scheibe, die häufig als „Pfannkuchen“ (englisch pancake, siehe Abbildung 2.3) bezeichnet wird. Nur in diesem Pfannkuchenbereich kann die Druckwelle z.B. mit Hilfe von Hydrophonen detektiert werden.

Nachteilig für die gleichzeitige akustische und optische Detektion ist hier die zum Cherenkovlicht nahezu senkrechte Ausbreitungsrichtung. Die Abschwächlänge des akustischen Signals ist jedoch deutlich länger als die des optischen Signals.

2.3 ANTARES

ANTARES steht für „Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RE-Search“, zu Deutsch etwa „Astronomie mit einem Neutrino-Teleskop und Forschung in der Tiefsee“. Es ist also ein Neutrino-Teleskop und befindet sich im Mittelmeer etwa 40 km südöstlich von Toulon (Frankreich) in einer Tiefe von 2400m unter der Wasseroberfläche. Bestandteile sind 12 Lines plus eine Instrumentation Line. Die Lines bestehen aus langen Kabeln, die mit einem schweren Anker auf dem Meeresboden fixiert sind und an ihrem oberen Ende eine Boje haben, welche die Line straff hält. Auf diesen Kabeln sind die einzelnen Detektoren in sogenannten Stockwerken angeordnet. Die räumliche Anordnung der einzelnen Lines ist aus Abbildung 2.5 ersichtlich.

Verbunden sind diese Lines mit einer Junction Box, die die Daten sammelt und ungefiltert an das ANTARES-Kontrollzentrum in La Seyne sur Mer (an der Küste) weiterleitet, wo diese gefiltert und aufgezeichnet werden. Im Gegensatz zu einer Filterung direkt im Meer lassen sich somit Änderungen (zum Beispiel der gewünschten Daten die den Filter passieren sollen) deutlich einfacher implementieren.

Vollständig in Betrieb ging ANTARES (nach Gründung der Kollaboration 1996) am 30. Mai 2008 (Stolarczyk 2008). Derzeit ist eine Laufzeit bis 2016 geplant.

Als Koordinatensystem wird in dieser Arbeit das im Programmcode von Thurn (2007) verwendete benutzt. Dabei ist die y-Achse in Richtung der Verbindungsleitung Junction Box - Instrumen-

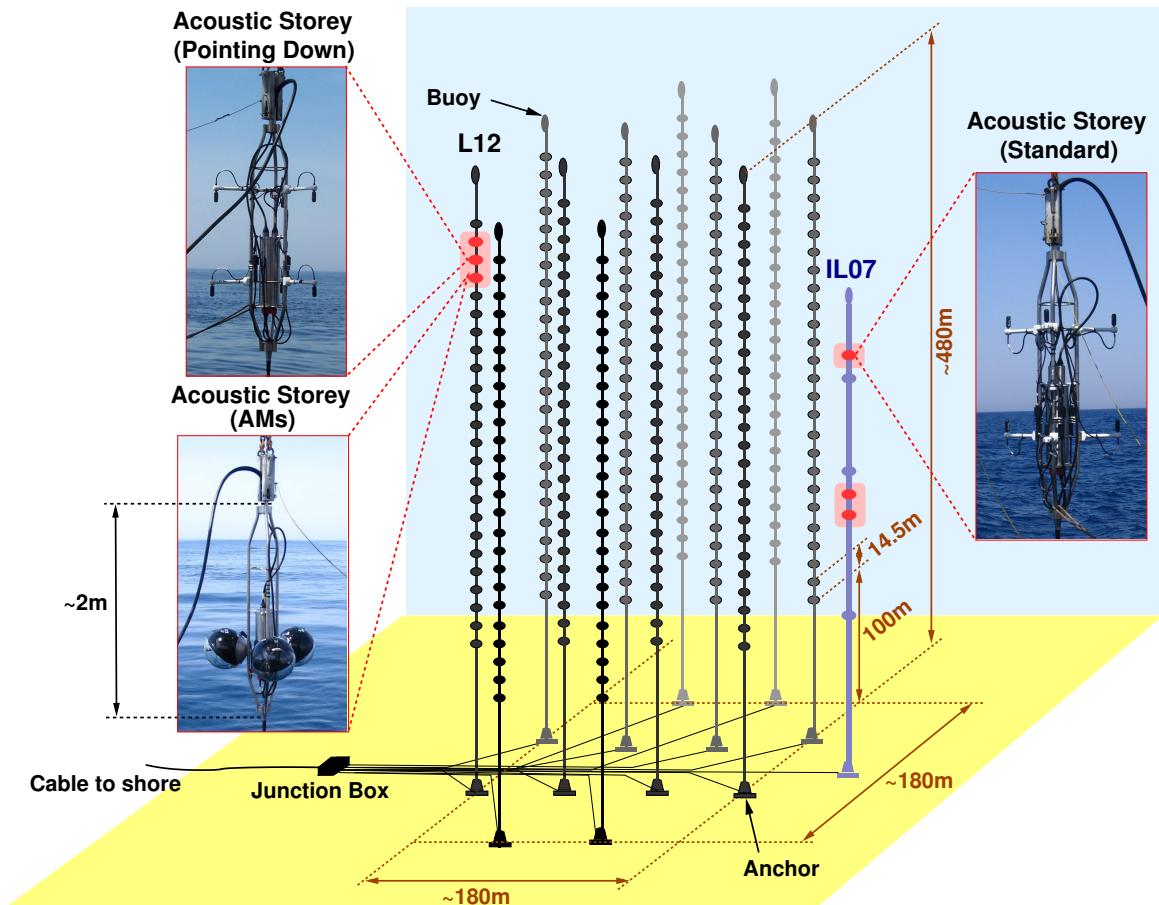


Abbildung 2.4: Skizze des ANTARES-Aufbaus (ANTARES-Gruppe Erlangen 2011)

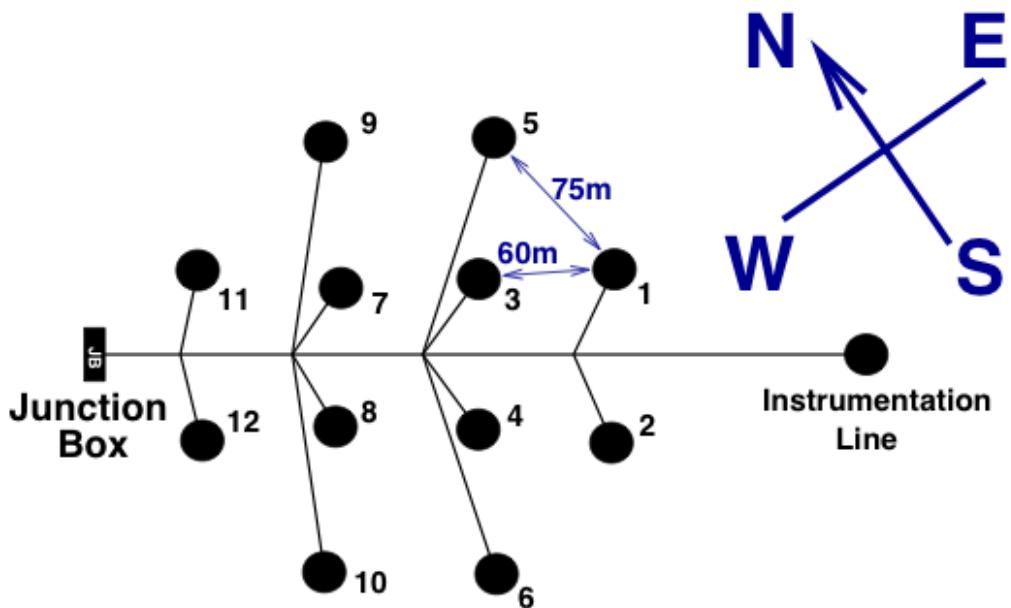


Abbildung 2.5: Idealisierter Grundriss des ANTARES-Detektors (Hartmann 2006, S. 30)

Line	x-Position[m]	y-Position[m]
1	-37	90
2	37	90
3	-30	30
4	30	30
5	-90	37
6	90	37
7	-30	-30
8	30	-30
9	-90	-37
10	90	-37
11	-37	-90
12	37	-90
IL	0	150

Tabelle 2.1: Idealisierte x- und y-Positionen der ANTARES-Lines, die in der Arbeit verwendet wurden (Thurn 2007)

tation Line und die x-Achse senkrecht dazu. Die z-Achse ist in Richtung der Wasseroberfläche. Nullpunkt der x-Achse ist die y-Achse, Nullpunkt der y-Achse ist in der Mitte des Detektors. Nullpunkt der z-Achse ist der Meeresgrund. Damit ergeben sich für die idealisierten x- und y-Positionen der Lines die Werte aus Tabelle 2.1. ANTARES selbst verwendet ein anderes Koordinatensystem (das UTM-Grid), hier wird jedoch zur Vereinfachung das eben eingeführte System beibehalten.

2.3.1 Optischer Aufbau

Die Lines 1 bis 11 dienen rein der optischen Detektion und sind alle gleich aufgebaut. Das erste Stockwerk befindet sich auf 100m Höhe (über dem Meeresboden, was in diesem Fall wie bereits erwähnt der z-Koordinate entspricht) und alle weiteren Stockwerke (insgesamt 25) sind im Abstand von jeweils 14,5m zum vorhergehenden angebracht (ANTARES Collaboration 2008). In jedem Stockwerk befinden sich drei optische Module (OM, siehe Abbildung 2.6). Dies sind Glaskugeln mit einem Durchmesser von 43cm und einer Dicke von 15mm. In ihnen befindet sich je ein Photomultiplier, der das empfangene Licht in elektrische Signale umwandelt. Die OM sind um jeweils 120° versetzt angebracht und zur Verringerung des Einflusses atmosphärischer Myonen (und sonstigen Lichts von oben) um 45° nach unten verschwenkt.

Die Messwerte der OM werden in einem Elektronikcontainer in jedem Stockwerk digitalisiert und anschließend zur Junction Box geführt, die sie zur weiteren Verarbeitung an die Küste weiterleitet (ANTARES Collaboration 2008).

Der Aufbau der Line 12 sowie der Instrumentation Line (siehe Kapitel 2.3.2 unterscheiden sich von dem der ersten elf. Line 12 hat insgesamt nur 24 Stockwerke, wobei die Stockwerke 21-23 akustische Stockwerke (siehe Abschnitt 2.3.2) sind. Die Geometrie (Position und Abstand der Stockwerke) ist ansonsten jedoch gleich der der Lines 1-11 (mit Ausnahme des fehlenden 25. Stockwerkes).

2.3.2 Akustischer Aufbau

Die Line 12 und die Instrumentation Line sind mit den akustischen Empfängern des AMADEUS-Systems ausgestattet. Auf der Line 12 haben die akustischen Stockwerke die Höhen 380, 395 und 410m über der Meeresoberfläche (ANTARES Collaboration 2010). Die Instrumentation Line,



Abbildung 2.6: Optisches ANTARES-Stockwerk (ANTARES-Gruppe Erlangen 2011)

deren akustischen Stockwerke die z-Koordinaten 180, 195 und 305m haben, ist vollständig anders aufgebaut als die übrigen Lines. Sie enthält neben diesen akustischen Stockwerken auch Messgeräte, um die Umweltbedingungen zu erfassen, für die Kalibration des Neutrino-Teleskops und für die Meeres- und Geoforschung.

Es gibt verschiedene akustische Stockwerkstypen. Der Standardtyp (Abb. 2.7a) besteht aus nach oben gerichteten Hydrophonen. Das zentrale Stockwerk in Line 12 (Abb. 2.7b) wurde mit nach unten gerichteten Hydrophonen ausgestattet. Das unterste Stockwerk auf Line 12 (Abb. 2.7c) hingegen wurde mit in eine Glaskugel (wie sie bei den optischen Modulen verwendet wird) geklebten piezoelektrischen Elementen ausgestattet, um eine mögliche Vereinheitlichung und Kombination der optischen und akustischen Bauteile zu testen.

Drei Stockwerke haben kommerzielle Hydrophone, zwei weitere am ECAP entwickelte Modelle. Die Hydrophone selbst enthalten piezoelektrische Elemente zur Umwandlung der Schallsignale in Spannungssignale. Details und Messungen zu den unterschiedlichen Hydrophon-typen finden sich in ANTARES Collaboration (2010).

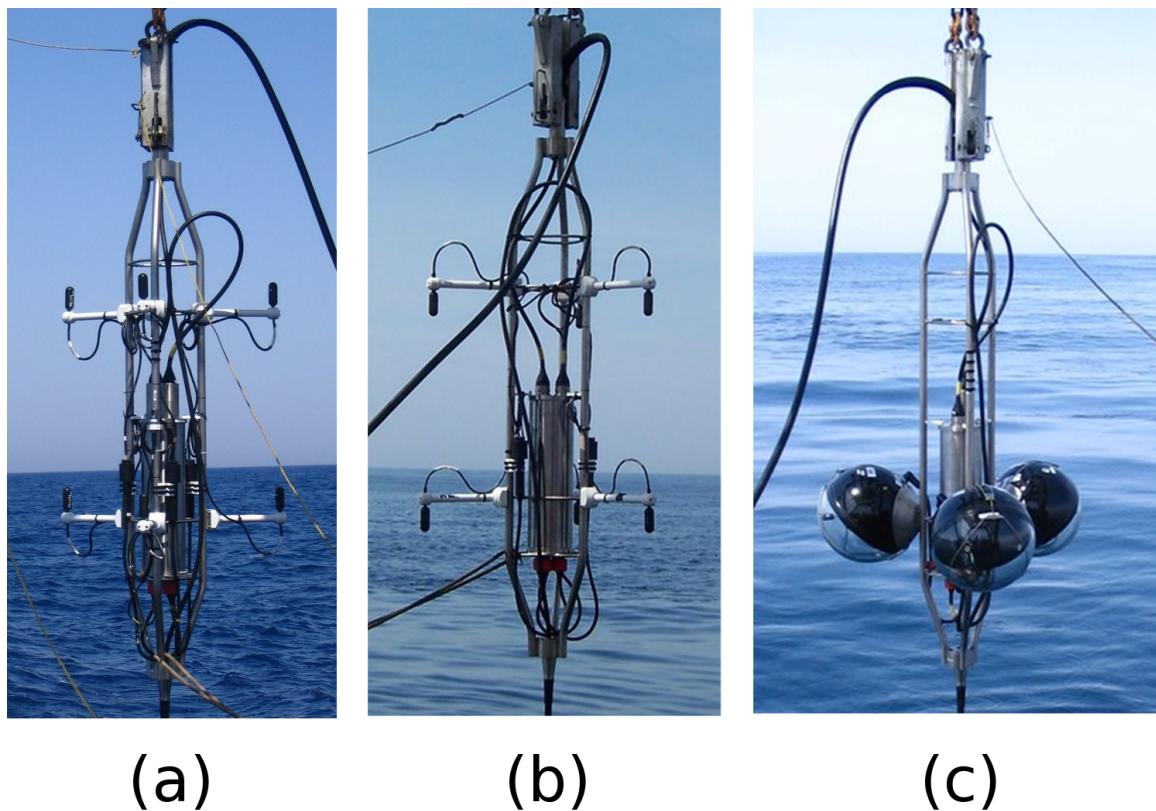


Abbildung 2.7: Varianten der akustischen Stockwerke bei AMADEUS: (a) Standardstockwerk, (b) zentrales Stockwerk von Line 12, (c) unterstes Stockwerk auf Line 12 (ANTARES-Gruppe Erlangen 2011)

Kapitel 3

Akustischer Nachweis

3.1 Simulationsmethode

Die Simulationen wurden mit Hilfe eines Matlab-Programms durchgeführt. Aufgrund der begrenzt verfügbaren Rechenleistung wurden dabei einige Vereinfachungen durchgeführt, so dass man schließlich folgendes Modell erhält:

3.1.1 Detektionsbedingung

Für diese Arbeit wurden die akustischen „Pfannkuchen“ als unendlich ausgedehnte Ebene angenommen. Eine Ebene folgt generell der Ebenengleichung

$$(\vec{p} - \vec{o}) \cdot \vec{r} = 0 \quad (3.1)$$

mit dem Normalenvektor (der senkrecht auf der Ebene steht) \vec{r} , dem Ortsvektor \vec{o} eines beliebigen Punktes in der Ebene und dem Ortsvektor \vec{p} eines Punktes p , von dem wir wissen wollen, ob er auf der Ebene liegt (dies ist dann der Fall, wenn er der Ebenengleichung genügt).

In unserem Fall nimmt man als Normalenvektor \vec{r} den Impulseinheitsvektor des Neutrinos, der auch in guter Näherung die Schauerrichtung angibt. Als Ortsvektor \vec{o} wird der des Interaktionsvertexes benutzt, da man den Schauer akustisch als punktförmig betrachten kann. \vec{p} ist der abzufragende Punkt (in unserem Fall also die Hydrophoneposition). Somit erhält man ausgeschrieben als zu erfüllende Gleichung:

$$(p_1 - o_1)r_1 + (p_2 - o_2)r_2 + (p_3 - o_3)r_3 = 0 \quad (3.2)$$

Hierbei erhalten die x -Komponenten den Index 1, die y -Komponenten den Index 2 und die z -Komponenten den Index 3.

Der Interaktionsvertex \vec{o} sowie der Impulseinheitsvektor \vec{r} sind durch die Simulation gegeben. Die Komponenten p_1 und p_2 sind durch die Positionen der Lines, auf denen die Hydrophone liegen, gegeben. Für die Hydrophone wurden folgende vereinfachende Annahmen gemacht:

Die Hydrophone an sich wurden als punktförmig auf der Mitte der Line gelegen gesehen. Die 6 akustischen Stockwerke wurden in 3 zusammenhängende Bereiche eingeteilt (Tabelle 3.1). Der

Bereichsname	Line	Höhen[m]	akzeptierter Bereich[m]
l12	12	380, 395, 410	375-415
ilu	IL	180, 195	175-200
ilo	IL	305	300-310

Tabelle 3.1: Akustisch sensitive Bereiche in Simulation

Öffnungswinkel des akustischen Pfannkuchens ist etwa $\pm 0.5^\circ$, somit erhält man als Bereich, in dem das Signal über oder unter der Position detektiert wird bei etwa 1km Abstand rein geometrisch

$$\Delta z = \tan 0.5^\circ \cdot 1\text{km} \approx 10\text{m} \quad (3.3)$$

Wann immer also einer der sensitiven Bereiche $\pm 5\text{m}$ von der Ebene geschnitten wird gilt das Signal als am Hydrophon angekommen.

Somit benötigen wir die z-Koordinate der Ebene an der Hydrophon-x/y-Position, die sich nach Gleichung 3.2 ergibt zu:

$$p_3 = \frac{o_3 r_3 + (o_1 - p_1)r_1 + (o_2 - p_2)r_2}{r_3} \quad (3.4)$$

Der Punkt p_3 muss dann für einen Treffer in den in Tabelle 3.1 akzeptierten Bereichen liegen. Die Gleichung 3.4 ist allerdings nur gültig, solange der Impuls in z-Richtung (r_3) nicht 0 ist (da sich sonst eine Division durch 0 ergeben würde). Ist dies der Fall, so muss man eine der folgenden Sonderbehandlungen durchführen:

- Der Fall, dass alle Komponenten von \vec{r} gleichzeitig 0 sind, kann nicht vorkommen, da wir dann auch keinerlei Schauerachse hätten. Somit braucht dieses Szenario nicht berücksichtigt zu werden.
- Für den Fall dass r_1 oder $r_2 = 0$ erhalten wir als Ebenengleichung

$$p_{1/2} = o_{1/2} \quad (3.5)$$

was auch mathematisch leicht einsichtig ist, da es ja keine Möglichkeit mehr für die Komponente gibt, einen anderen Wert anzunehmen.

- Für den Fall $r_{1,2} \neq 0$ muss mathematisch gelten:

$$p_1 = \frac{(o_2 - p_2)r_2}{r_1} + o_1 \quad (3.6)$$

3.1.2 Ereignissimulation

Zur Simulation wurden Neutrinoereignisse (definiert durch Interaktionsvertex und Impulsrichtung) erzeugt. Dabei wird zunächst für den Interaktionsvertex der Raum durchrastert. In z-Richtung geht diese Durchrasterung von 0 bis 2000m in 20m-Schritten. In x- und y-Richtung wurden in verschiedenen Simulationen verschiedene Bereiche (von -2000 bis 2000m bis -16000 bis 16000m - über 16km spielt bereits Beugung des Schallsignals eine wesentliche Rolle, deswegen werden hier höhere Abstände zum Detektorzentrum unberücksichtigt gelassen) in Schrittweiten von 20 bis 160m (so dass immer genau gleich viele Rasterpunkte entstanden) als guter Kompromiss zwischen wenigen Ereignisverlusten und Rechenzeit gewählt. Insgesamt enthielt somit jede Simulation 4.080.501 Rasterpunkte. Höhere Abstände entsprechend unter Berücksichtigung der Abschwächung (die hier nicht erfolgt ist) höheren Neutrinoenergien.

In jedem dieser Rasterpunkte sind theoretisch alle möglichen von oben kommenden Flugrichtungen des Neutrinos erlaubt. Von unten kommende Neutrinos sind bei diesen Energien sehr unwahrscheinlich, da der Wirkungsquerschnitt bereits groß genug für eine Reaktion über den Durchmesser der Erde wäre. Um dies zu berücksichtigen, beschreibt man die Flugrichtungen mittels Kugelkoordinaten. Der Azimuthalwinkel φ geht dabei von 0 bis 360° , der Polarwinkel ϑ nur von 0 bis 90° (höhere Werte würden von unten kommende Neutrinos bedeuten). Zunächst wurden diese Werte für einige kleine Probepunktsamples in 1° -Schritten gescannt. Dies führte jedoch zu einer inakzeptablen Rechenzeit, woraufhin mit 5° -Schritten für φ und 3° -Schritten für

ϑ bei den gleichen Punktsamples ein guter Kompromiss gefunden wurde, der akzeptable Rechenzeit ergab, jedoch gegenüber 1°-Schritten praktisch keine Trefferverluste mit sich brachte. Rein geometrisch umfasst bereits bei 10km Entfernung der ilo-Bereich (siehe Tabelle 3.1) nur noch einen Winkelabschnitt von 0,5°, dies wäre jedoch im Rahmen dieser Arbeit zu rechenaufwändig. Als Ausgabe erzeugt das Programm eine Textdatei mit je einer Zeile für jedes Event das die sensitiven Bereiche getroffen hat. Dabei sind von links nach rechts folgende Daten zur Weiterverarbeitung enthalten:

- x/y/z-Koordinaten des Interaktionsvertex
- φ/ϑ -Koordinaten des Impulsvektors
- Angabe, welche der drei Bereiche (l12, ilu, ilo, siehe Tabelle 3.1) detektiert haben

Zur Bestimmung des effektiven Volumens wurde ebenfalls ein Matlab-Programm geschrieben, das die Einträge in der Ausgabedatei des ersten Programms zählt und daraus

$$V_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{det}}}{N_{\text{sim}}} \cdot V_{\text{sim}} \quad (3.7)$$

berechnet, wobei hier V_{eff} das effektive Volumen ist, N_{det} die Anzahl der detektierten Ereignisse, N_{sim} die Anzahl der simulierten Ereignisse (hierbei ist jeder neue Winkelschritt ein neues Ereignis, so dass man 8.813.882.160 Ereignisse erhält) und V_{sim} , das simulierte Volumen (in dem man die Ereignisse simuliert hat, in unserem Fall also 32 bis 2048 km³).

Dabei wird sowohl das Ansprechen nur einer Line (Line 12 oder Instrumentation Line) als auch das Ansprechen beider Lines gleichzeitig (nützlich für weitere Rekonstruktionen) getrennt gezählt.

Diese Simulationen wurden dann für die verschiedenen Raumgrößen auf dem ECAP-Computercluster gerechnet und die Ergebnisse weiteranalysiert.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Räumliche Verteilung

Die räumlichen Verteilungen der detektierten akustischen Neutrinos wurden mit Hilfe von Matlab dargestellt. Dabei wurden zunächst für jeden einzelnen Raumpunkt sämtliche detektierte Ereignisse (für alle Flugwinkel) zusammengezählt. Dies wurde nun sowohl für den Fall dass nur eine Line detektiert als auch für den Fall das beide Lines detektieren für verschiedene Werte durchgeführt.

Außerdem wurden diese Werte in Höhenscheiben zerlegt und so 2D-Plots für die Events, die auf den Höhen 0, 320, 480, 960 und 1920m liegen erstellt. Dies wurde jeweils für die Fälle von einer beziehungsweise zwei detektierenden Lines durchgeführt. Wir erhalten somit eine Art „Scheibe“, die nur die in dieser Höhe erzeugten Neutrinoereignisse enthält. Die Linepositionen wurden (natürlich stark vergrößert dargestellt) als schwarze Quadrate eingezeichnet.

Wie in Abbildung 3.1 ersichtlich, erhalten wir für den Fall, dass wir nur 1 Line als ausgelöst betrachten wollen, eine in der x-y-Ebene isotrope Verteilung. Im Mittelpunkt des Detektors liegt erwartungsgemäß die höchste Dichte, zu den Rändern hin nimmt sie in jede Richtung ziemlich gleichmäßig ab. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei zwischen den beiden akustischen Lines detektierten Ereignissen die Wahrscheinlichkeit wenigstens eine der beiden Lines zu treffen sehr hoch ist, da die Winkelschritte noch kleine Schritte auf den Lines bedeuten. Je weiter man nach außen kommt, desto größer sind die Strecken auf den Lines pro Winkelschritt, weswegen deutlich weniger Ereignisse detektiert werden.

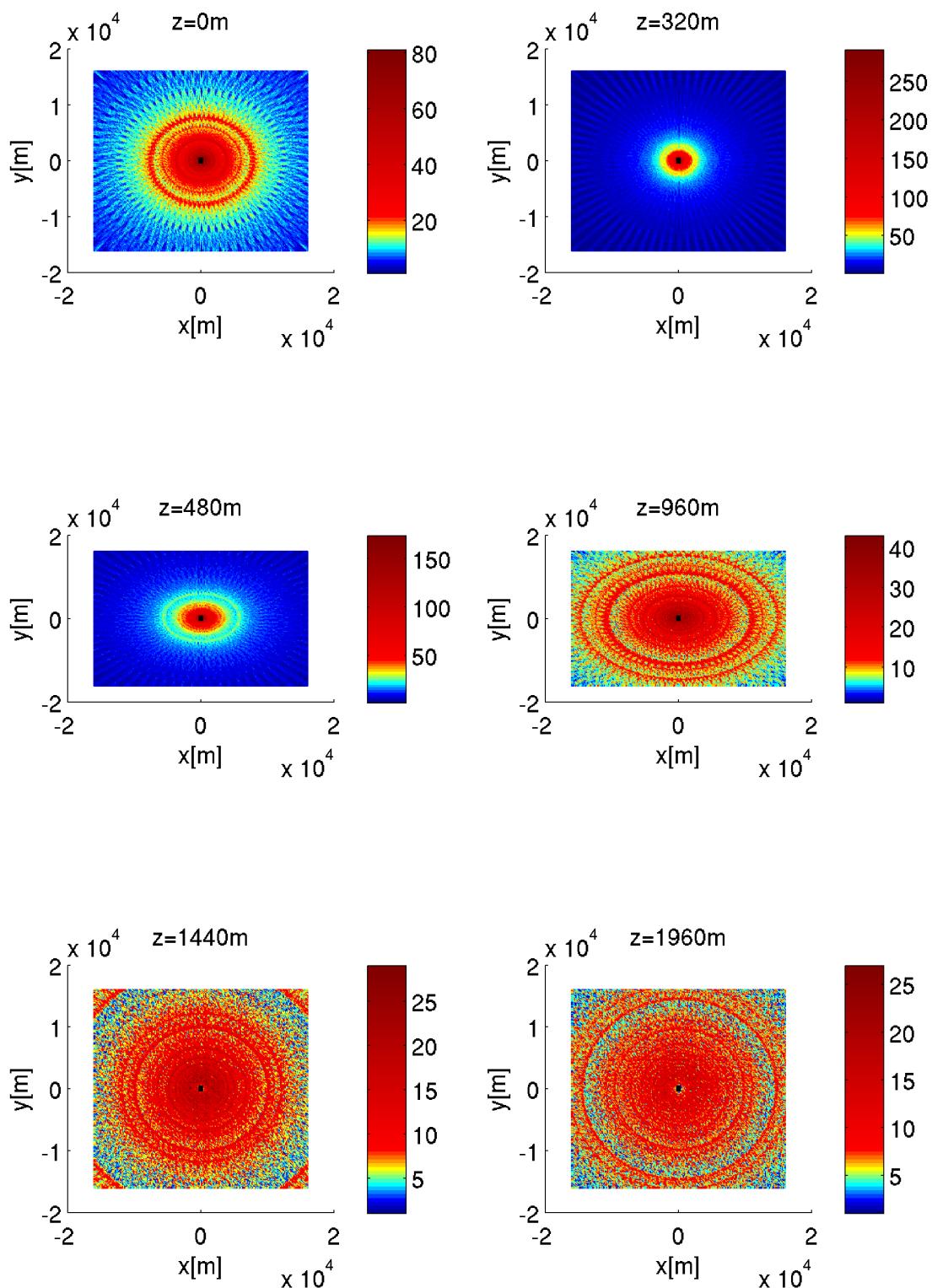


Abbildung 3.1: Anzahl der detektierten Ereignisse in der x - y -Ebene für verschiedene z -Werte und 1 detektierte Line auf 2048km^3

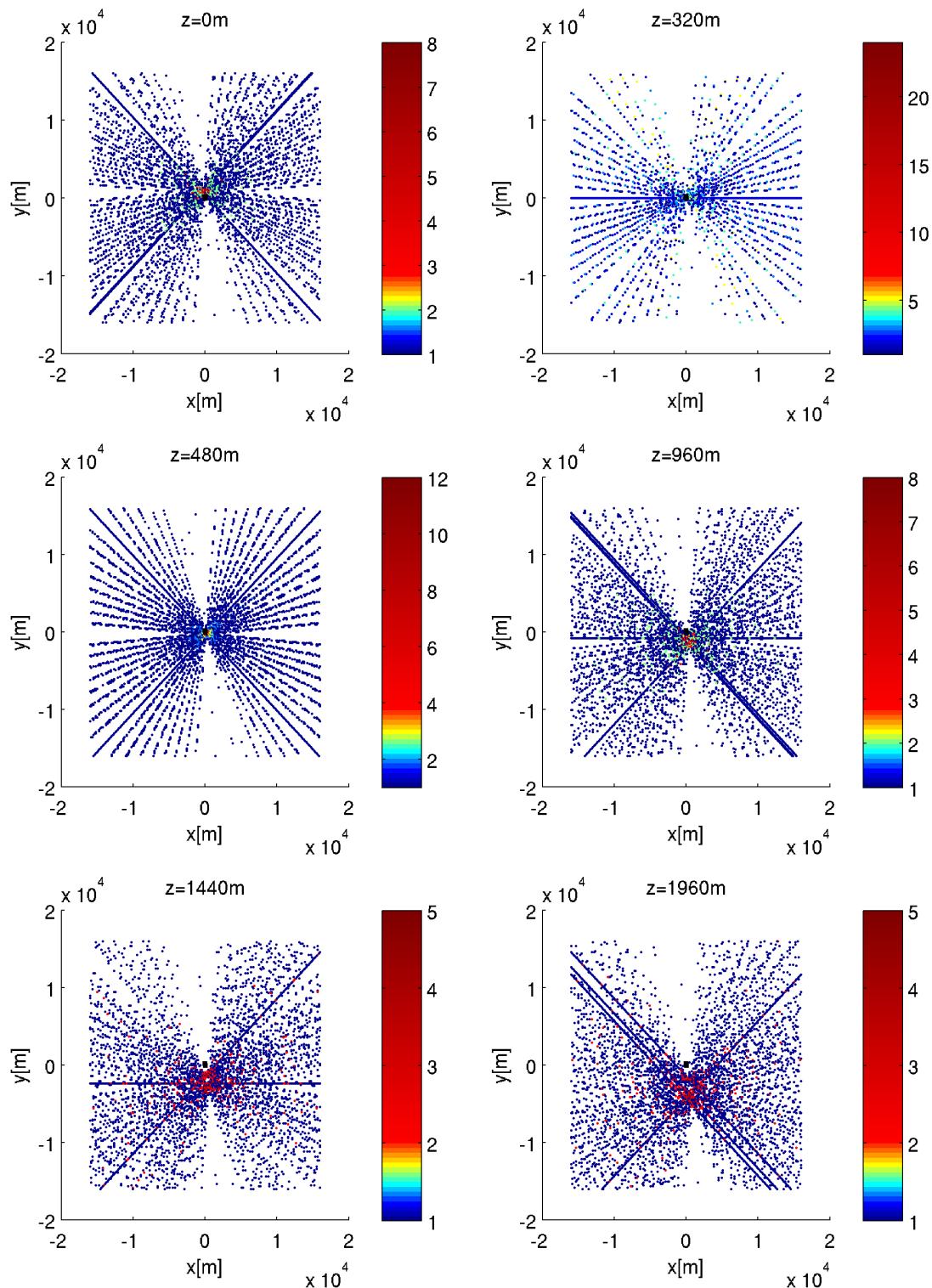


Abbildung 3.2: Anzahl der detektierten Ereignisse in der x - y -Ebene für verschiedene z -Werte und 2 detektierte Lines auf 2048km^3

$V_{\text{gen}}[\text{km}^3]$	# detektiert 1 Line	# detektiert 2 Lines	$V_{\text{eff},1}[\text{km}^3]$	$V_{\text{eff},2}[\text{km}^3]$
32	154056598	2683099	0.5593	0.0097
72	127527281	2081774	1.0418	0.0170
128	109373233	1693420	1.5884	0.0246
200	96112721	1409533	2.1809	0.0320
288	85924965	1197743	2.8077	0.0391
392	77851555	1035153	3.4625	0.0460
512	71211457	912426	4.1367	0.0530
648	65661556	808839	4.8275	0.0595
800	60908464	733498	5.5284	0.0666
968	56836162	667271	6.2421	0.0733
1152	53315841	614583	6.9685	0.0803
1352	50234123	564244	7.7056	0.0866
1568	47507093	526685	8.4516	0.0937
1800	45108251	491851	9.2122	0.1004
2048	42876403	462910	9.9628	0.1076

Tabelle 3.2: Simulationsergebnisse für akustisches effektives Volumen, Erklärung der Spalten: siehe Text

Die Ringstruktur ist vermutlich durch Digitalisierungseffekte zu erklären. Da hier mit 5° und 3° mit relativ großen Schritten gearbeitet wird kann es schon bei kleinen Änderungen im Ort zufällig sein, dass der Winkelschritt außerhalb des akustisch sensitiven Bereichs liegt. Beim nächsten kleinen Ortsschritt kann dies schon wieder anders sein.

In z-Richtung erhalten wir auch etwa in der Mitte der gesamten akustischen sensitiven Bereiche (hier bei 320m) die höchste Ereigniszahl. Dies hängt ebenfalls damit zusammen, dass es dabei sehr leicht ist, dass zumindest eine der drei Bereiche anspricht, weil die Winkelschritte nach wie vor klein sind. Mit steigender Höhe nimmt die Ereigniszahl erwartungsgemäß ab, wobei sich an der Grundverteilung nicht viel ändert. In großen Höhen (kurz vor der Meeresoberfläche) gibt es kaum noch Veränderungen, da die Entfernung zu den Detektoren dann schon sehr groß sind (wie aus den Abbildungen für 1440 und 1920m ersichtlich ist).

Das Verhalten bei 2 Lines, die den „Pfannkuchen“ detektieren müssen, ist in Abbildung 3.2 gezeigt. In z-Richtung ändert sich nicht viel. Interessanter sehen jetzt jedoch die x-y-Plots aus: Hier sind einige „Streifen“ mit mehr Ereignissen und einige völlig (oder nahezu völlig) ohne Ereignisse zu sehen. Die Lücken kommen dadurch zustande, dass an bestimmten Orten die Ebenen so liegen, dass sie durch beliebiges Verkippen nicht gleichzeitig beide Detektoren schneiden können und immer mindestens einer außerhalb der Ebene liegt. Wie man erkennt liegen die Lücken auch etwa auf der Fläche durch die beiden Lines.

Die Streifenstruktur entsteht durch die relativ grobe Abrasterung des Bereichs, da eine feinere Abrasterung einen inakzeptablen Rechenaufwand bedeutet hätte.

3.2.2 Effektives Volumen

Um das effektive Volumen des AMADEUS-Apparats zu bestimmen wurden alle Ereignisse, die auf einer bzw. auf beiden Lines detektiert wurden, gezählt. Dies wurde für verschiedene Volumina von 32 bis 2048 km^3 durchgeführt. Dann wurde das effektive Volumen gemäß Formel 3.7 berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind aus Tabelle 3.2 ersichtlich.

Zu beachten ist, dass hierbei keinerlei Abschwächung des akustischen Signals angenommen wurde. Graphisch aufgetragen wurden die Ergebnisse in den Abbildungen 3.3 und 3.4.

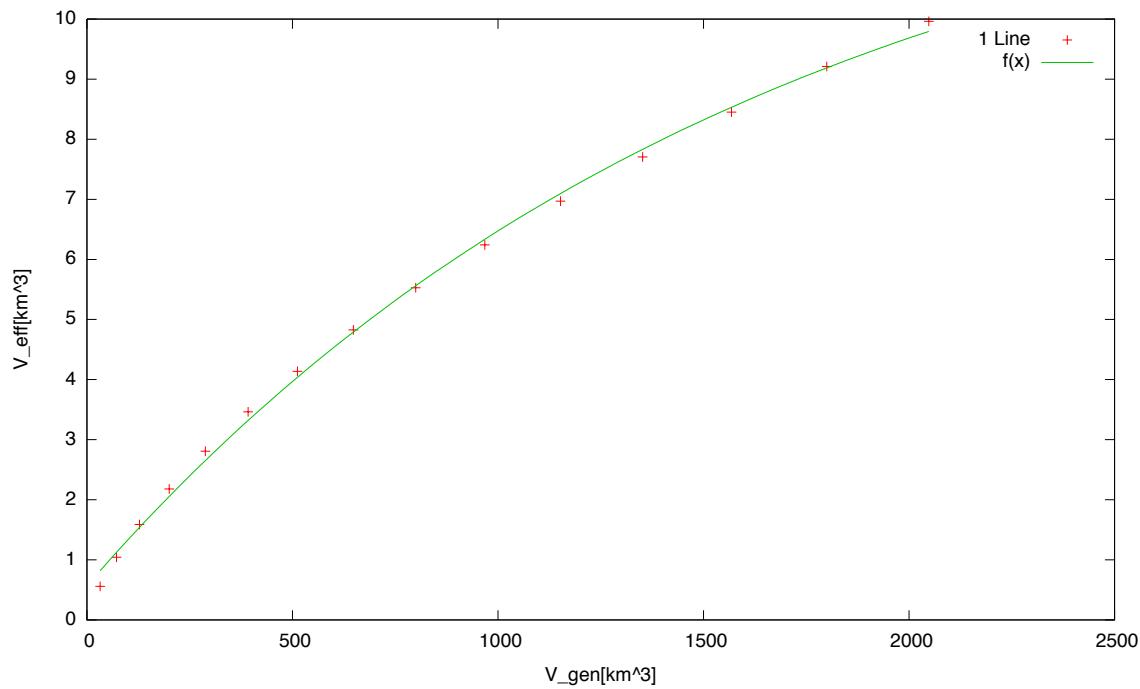


Abbildung 3.3: Effektives Volumen des AMADEUS-Apparats in Abhängigkeit vom simulierten Volumen für von 1 Line detektierte Events

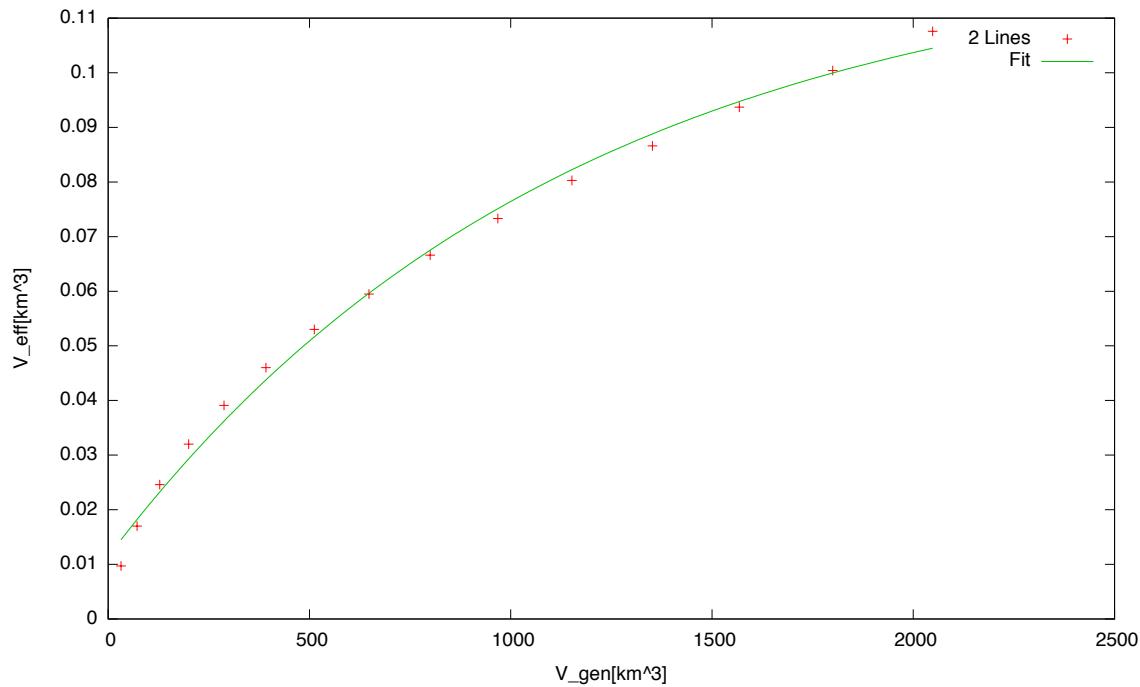


Abbildung 3.4: Effektives Volumen des AMADEUS-Apparats in Abhängigkeit vom simulierten Volumen für von 2 Lines detektierte Events

Durch fitten einer Exponentialfunktion wurden als Funktionen für 1 Line

$$V_{\text{eff},1}(V_{\text{gen}}) = -((12.9 \pm 0.06) \cdot \exp(-(0.00061 \pm 0.00005) \cdot V_{\text{gen}})) + (13.5 \pm 0.6) \quad (3.8)$$

sowie für 2 Lines

$$V_{\text{eff},2}(V_{\text{gen}}) = -((0.112 \pm 0.005) \cdot \exp(-(0.00086 \pm 0.00009) \cdot V_{\text{gen}})) + (0.123 \pm 0.005) \quad (3.9)$$

gefunden. Die Volumina sind dabei in km^3 anzugeben. Wie jedoch aus den Plots ersichtlich ist passt die Exponentialfunktion nicht wirklich gut. In anderen Arbeiten (z.B. Karg (2006)) wurde bisher kein Fit durchgeführt.

Wie man leicht erkennt, gehen für den Fit die effektiven Volumen für den Fall eines unendlich großen Simulationsvolumens gegen $13.5 \pm 0.6 \text{ km}^3$ für 1 Line und gegen $0.123 \pm 0.005 \text{ km}^3$ für beide Lines. Dies kommt in diesem Fall vor allem durch die Vergrößerung der Abstände zwischen unseren simulierten Winkelschritten zustande: Je weiter entfernt ein Punkt vom Detektor ist, desto größer ist pro Winkelschritt die entsprechende Distanz „auf einer Line“, so dass weniger simulierte Winkel eine Ebene, die den sensitiven Bereich schneidet, erzeugen. Ab 16 km spielt jedoch sowieso - wie bereits erwähnt - die Beugung zunehmend eine große Rolle, so dass die Simulation dann keine realitätsnahen Ergebnisse mehr liefert (beziehungsweise die Beugung berücksichtigen müsste, was hier nicht erfolgt ist).

Kapitel 4

Optischer Nachweis

Auch die Simulation des optischen Nachweises wurde mit einem Matlab-Programm durchgeführt. Hier fanden ebenfalls aufgrund der begrenzten Rechenleistung Vereinfachungen Anwendung.

4.1 Simulationsmethode

Vereinfacht wird hier in jedem Stockwerk statt 3 OM ein OM angenommen, das sich in der Mitte des Stockwerks befindet.

Laut Hartmann (2006) erhält man die Anzahl der an einem OM detektierten Photonen durch

$$n_{i,c} = N \cdot a_i(\gamma_i) \cdot \Lambda_{att} \cdot \frac{2\alpha_i}{360^\circ \cdot \sin \vartheta_i} \cdot D(\vartheta_i, E_{sh}) \cdot 2\alpha_i \quad (4.1)$$

Dabei ist N die Anzahl der insgesamt vom Schauer emittierten Photonen, $a_i(\gamma_i)$ die Winkelefizienz der OM (die hier zur Vereinfachung mit 1 angenommen wird, also keinerlei Winkelabhängigkeit) und ϑ_i der Winkel zwischen der Schauerachse und dem OM am Interaktionsvertex. Der Winkel

$$\alpha_i = \arctan R_{OM} / |\overrightarrow{PQ}_i| \quad (4.2)$$

ist der Öffnungswinkel des OM OM_i . Hierbei ist $R_{OM} = 21,7\text{cm}$ der OM-Radius und \overrightarrow{PQ}_i der Verbindungsvektor vom Interaktionsvertex zum Zentrum des optischen Moduls.

In der Photonenabschwächung

$$\Lambda_{att} = e^{-|\overrightarrow{PQ}_i|/\tau} \quad (4.3)$$

wird die Abschwächlänge τ hier pauschal mit 100m angenommen. Für genauere Ergebnisse müsste diese abhängig von hauptsächlich der Wellenlänge des Lichts genauer bestimmt werden. Die Photonenwinkelverteilung $D(\vartheta_i, E_{sh})$ eines Schauers ergibt sich aus Gleichung 2.3 in Kapitel 2.2.1.

Weitere Vorgabewerte sind eine Quanteneffizienz der Photomultiplier von 0,2 und eine Neutrinoenergie von 10^{18}eV , von denen 20% in den Schauer gehen.

Das Programm liest nun die Ausgabedatei der akustischen Simulation ein und prüft je nach Einstellung bei jedem Punkt der akustisch auf einer oder auf beiden Lines detektiert wurde für die Positionen aller 296 optischen Stockwerke ob genug Photonen eingetroffen sind. Dabei wird (um statistische Effekte zu berücksichtigen) die Anzahl der ankommenden Photonen mit der Quanteneffizienz multipliziert und mit einer Zufallszahl zwischen 0 und 1 verglichen. Ist das Ergebnis der Multiplikation größer als die Zufallszahl so gilt das optische Modul als getriggert. Dies ist natürlich nur eine Näherung, denn ab 5 Photonen ist der Wert 1 und damit immer größer als die Zufallszahl, für eine realistischere Betrachtung wäre hier eine Binomialstatistik notwendig.

Das Programm schreibt für jedes akustische Event eine Zeile in die Ausgabedatei, die von links nach rechts folgende Werte enthält:

- x/y/z-Koordinaten des Interaktionsvertex
- φ/ϑ -Koordinaten des Impulsvektors
- Anzahl der optischen Module, die getriggert haben.

Dabei wurden in einer ersten Programmversion sämtliche akustischen Events zur Ausgabedatei hinzugefügt. Mit dieser wurden alle Events, die von beiden akustischen Lines detektiert wurden, verarbeitet. Für die Events mit nur einer akustischen Line wurde anschließend aus Performancegründen die Bearbeitung auf dem Cluster parallelisiert und soweit optimiert dass nur noch Events, die auch von mindestens einem optischen Modul detektiert wurden (diese Annahme ist jedoch sehr optimistisch, da man damit nicht sicher sagen kann, dass es sich um Neutrinoereignisse handelt), in der Ausgabedatei auftauchen.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Räumliche Verteilung

Zur Darstellung der räumlichen Verteilung wurde im Wesentlichen wie in Kapitel 3.2.1 vorgegangen. Hierbei wurden alle sowohl optisch als auch akustisch detektierten Events getrennt für die Fälle der akustischen Detektion mit einer bzw. zwei Lines dargestellt. Aufgrund der kompakteren Ereignisverteilung wurden die dargestellten Höhen auf 0, 320, 480, 640, 960 und 1440m abgeändert.

Wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, folgt auch die Verteilung der Events, die von einer Line akustisch und mindestens einem optischen Modul optisch detektiert wurden einer relativ isotropen Verteilung in der x-y-Ebene.

Sowohl in der x-y-Richtung als auch in der Höhe fällt auf, dass bei über ca. 1,5km Abstand vom Nullpunkt der jeweiligen Achse kaum noch Ereignisse detektiert werden, obwohl für 2048km^3 detektiert wurde. Dies hängt mit der implementierten Abschwächlänge von 100m zusammen, so dass für größere Abstände nicht mehr genug Photonen von weiter draußen an den OM ankommen.

In Abbildung 4.2 ist ebenfalls wieder die Verteilung der fehlenden akustischen Treffer zu sehen. Auch nimmt hier die Trefferzahl nach weiter draußen noch drastischer ab als in Abbildung 4.1, was damit zusammenhängen könnte, dass die Ausstrahlung des Cherenkovlichtes und der Pfannkuchen nahezu senkrecht aufeinander stehen und ein hineinreichen beider gleichzeitig in den Detektorbereich (und dann auch noch zu beiden Hydrophonen) somit weiter außen deutlich unwahrscheinlicher ist.

4.2.2 Effektives Volumen

Das effektive Volumen wurde analog der Methode in Kapitel 3.2.2 bestimmt, wobei hier natürlich nur die kombinierten optischen und akustischen Treffer gezählt wurden. Die Werte dafür ergeben sich aus Tabelle 4.1.

Wie in der Tabelle zu sehen ist, liegen aufgrund der sehr hohen Rechenzeit leider nicht für alle Volumina für beide akustischen Detektionstypen (1 bzw. 2 Lines) Werte vor. Insgesamt kann man jedoch erkennen, dass das effektive Volumen im kombinierten optisch-akustischen Fall von der Optik festgelegt wird. Eine genauere Betrachtung für Volumina unter 32km^3 wäre noch interessant, fand jedoch leider aus Zeitgründen nicht mehr statt.

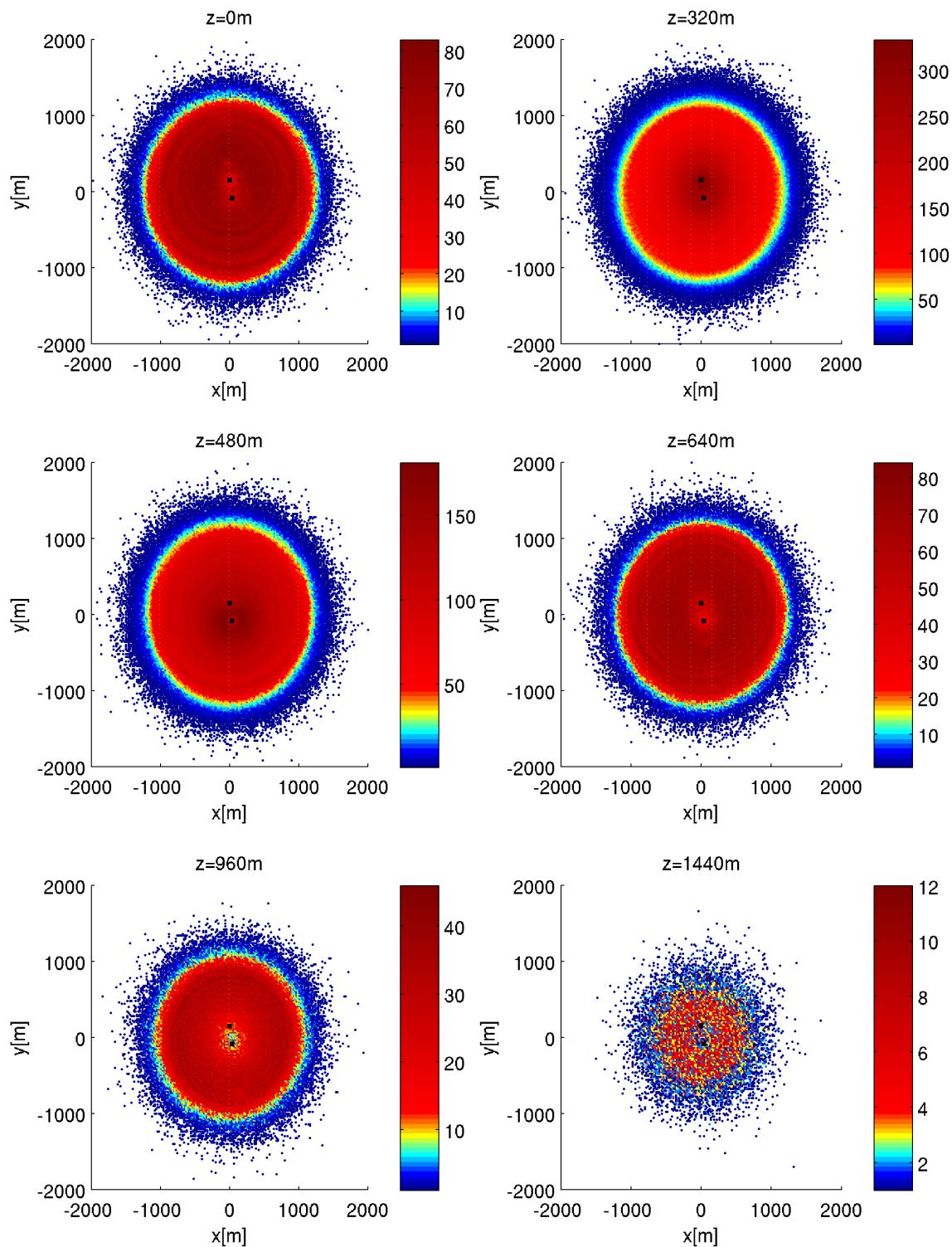


Abbildung 4.1: Verteilung der optisch und auf mindestens einer Line akustisch detektierten Ereignisse in jeweils einer x-y-Ebene

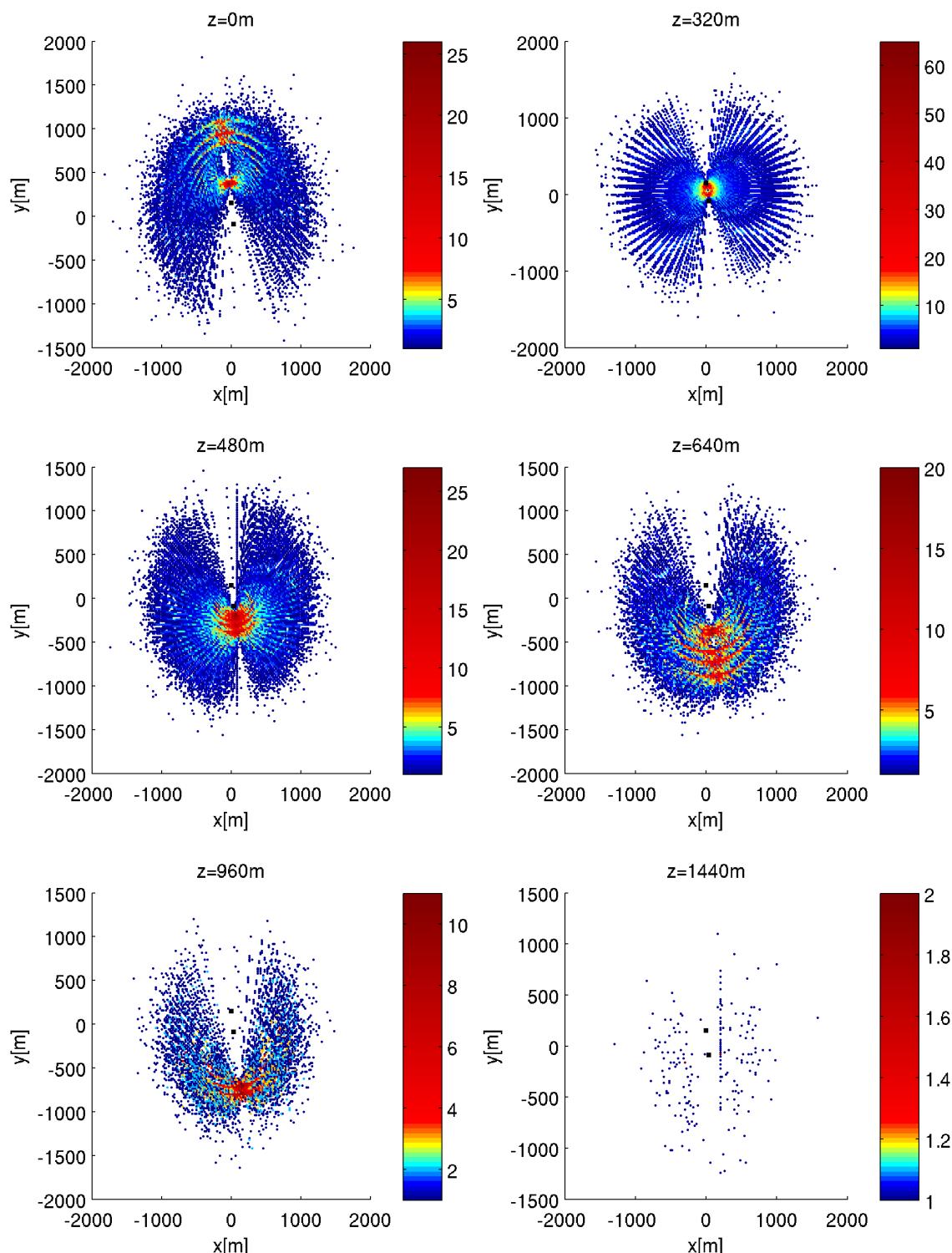


Abbildung 4.2: Verteilung der optisch und auf beiden Lines akustisch detektierten Ereignisse in jeweils einer x - y -Ebene

$V_{\text{gen}}[\text{km}^3]$	# det. (ak. 1 Line)	# det. (ak. 2 Lines)	$V_{\text{eff},1}[\text{km}^3]$	$V_{\text{eff},2}[\text{km}^3]$
32	47236588	817357	0.1715	0.0030
72		364490		0.0030
128	11809436	204414	0.1715	0.0030
200		130694		0.0030
288	5248581	90981	0.1715	0.0030
392		66907		0.0030
512	2950928	51344	0.1714	0.0030
648		40079		0.0029
800	1890034		0.1716	
968				
1152	1312376	22816	0.1715	0.0030
1352		19190		0.0029
1568				
1800		14758		0.0030
2048	737898	12807	0.1715	0.0030

Tabelle 4.1: Simulationsergebnisse für optisches effektives Volumen, Erklärung der Spalten: Siehe Text

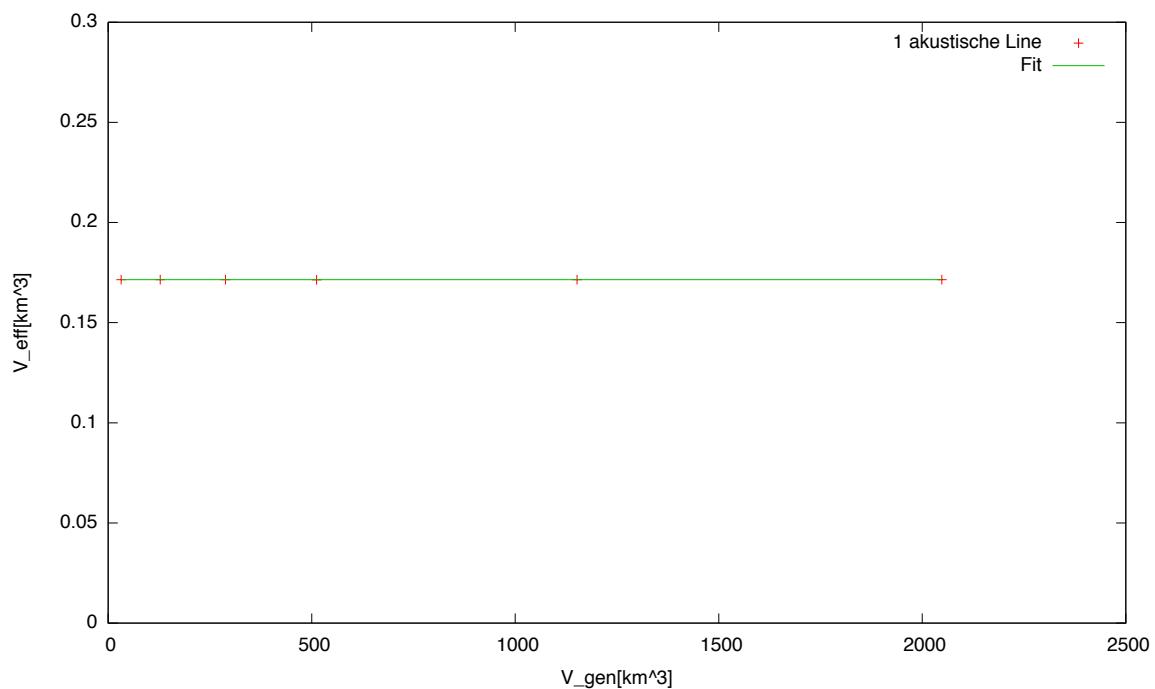


Abbildung 4.3: Effektives optisches Volumen in Abhängigkeit vom simulierten Volumen für von 1 Line akustisch detektierte Events

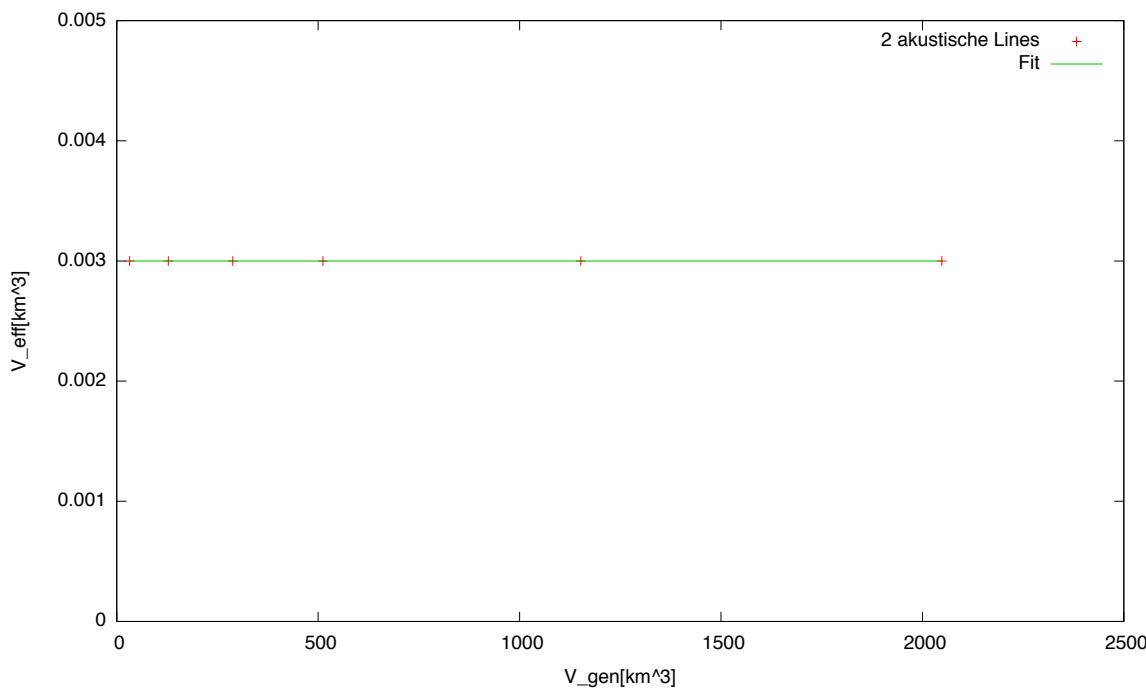


Abbildung 4.4: Effektives optisches Volumen in Abhängigkeit vom simulierten Volumen für von 2 Lines akustisch detektierte Events

Graphisch aufgetragen ergeben diese Werte die Abbildungen 4.3 und 4.4. Man erhält sehr schöne Geraden durch Fits mit vernachlässigbarer Steigung, weshalb wir die Werte als praktisch konstant ansehen können. Damit ergibt sich für von 1 Line akustisch detektierte Events

$$V_{\text{eff},1} = 0.17148 \pm 0.00003 \text{ km}^3 \quad (4.4)$$

und für von beiden Lines akustisch detektierte Events

$$V_{\text{eff},2} = 0.003 \text{ km}^3 \quad (4.5)$$

(hier ohne Fehlerberechnung, da die Varianz 0 ist). Dies zeigt noch einmal, dass hier der optische Teil der begrenzende Faktor ist und eine Untersuchung für Volumina unter 32 km³ sehr interessant wäre, da die Ergebnisse alle innerhalb des kleinsten generierten Volumens liegen.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt wurde in der vorliegenden Arbeit gezeigt, dass ein kombinierter optisch-akustischer Neutrino-nachweis mit dem in ANTARES/AMADEUS vorhandenen Mitteln durchaus möglich ist, wenn auch nur auf einem relativ kleinen effektiven Volumen. Dies ist jedoch kein großes Problem, da das AMADEUS-Setup hauptsächlich Testzwecken dient und um Erfahrungen für die akustische Teilchendetektion in zukünftigen größeren Detektoren zu sammeln.

Da nach den vorliegenden Ergebnissen die Optik der begrenzende Faktor zu sein scheint (und die optischen Abschwächlängen sowieso deutlich kleiner sind als die akustischen) sind die durch die vereinfachte Annahme von keiner Abschwächung gemachten Fehler im akustischen Teil vermutlich nicht sehr gravierend. Die Praxistauglichkeit der Ergebnisse bleibt noch experimentell zu überprüfen, da jedoch momentan noch kein einziges Neutrino akustisch detektiert wurde (Deutschlandfunk 2011), gestaltet sich dies derzeit noch als etwas schwierig.

Der große Vorteil der kombinierten Detektion ist die Möglichkeit, potentielle akustische Neutrinoereignisse mithilfe der Optik zu verifizieren. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass ein Ereignis, das keine Teilchenschauer erzeugt, sowohl die passenden optischen als auch die passenden akustischen Nachweisbedingungen gleichzeitig erfüllt. In der Regel erzeugen diese Ereignisse nur Licht oder Schall in der Art der Schauer.

Weitere Herausforderungen die noch bleiben sind z.B. die Unterscheidbarkeit von akustischen Teilchenschauerpulsen von Walgesängen und sonstigen Lauten des Tierreichs. Diese haben eine sehr ähnliche Form, weswegen auch die Biologie inzwischen auf das AMADEUS-Projekt aufmerksam geworden ist und die Hydrophone für ihre Zwecke nutzt, so dass man inzwischen im Internet¹ live in die von AMADEUS aufgenommenen Daten hineinhören kann. Dies wurde durch den fortschrittlichen Aufbau mit Filterung an der Küste ermöglicht.

Der aktuelle Stand der akustischen Teilchendetektion lässt also auf eine spannende Zukunft hoffen.

¹<http://listentothedeep.org/>

Literaturverzeichnis

ACoRNE Collaboration 2007

ACoRNE COLLABORATION: *Simulation of Ultra High Energy Neutrino Interactions in Ice and Water.* Astropart.Phys.28:366-379,2007

ACoRNE Collaboration 2009

ACoRNE COLLABORATION: *Study of the acoustic signature of UHE neutrino interactions in water and ice.* Nucl.Instrum.Meth.A607:398-411,2009

ANTARES Collaboration 2008

ANTARES COLLABORATION: *Performance of the First ANTARES Detector Line.* 2008

ANTARES Collaboration 2010

ANTARES COLLABORATION: *AMADEUS - The Acoustic Neutrino Detection Test System of the ANTARES Deep-Sea Neutrino Telescope*

ANTARES-Gruppe Erlangen 2011

ANTARES-GRUPPE ERLANGEN: *ANTARES Gallery.* <http://www.antares.physik.uni-erlangen.de/~antares/gallery2/>. Version: 03 2011

Askariyan u. a. 1979

ASKARIYAN, G. A. ; DOLOGOSHEIN, B. A. ; KALINOVSKY, A.N. ; MOKHOV, N.V.: Acoustic Detection of High Energy Particle Showers in Water. In: *Nuclear Instruments and Methods* (1979)

Deutschlandfunk 2011

DEUTSCHLANDFUNK: *Forschung aktuell: Neutrinos und Walgesänge.* <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/forschak/1368684/>. Version: 01 2011

Hartmann 2006

HARTMANN, Bettina: *Reconstruction of Neutrino-Induced Hadronic and Electromagnetic Showers with the ANTARES Experiment,* Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2006

Karg 2006

KARG, Timo: *Detection of ultra high energy neutrinos with an underwater very large volume array of acoustic sensors: A simulation study,* Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2006

Lahmann 2009

LAHMANN, Robert: *Status and First Results of the Acoustic Detection Test System AMADEUS.* Nucl.Instrum.Meth.Suppl.A604:158-163,2009

Leo 1994

LEO, William R.: *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach.* Springer, 1994. – ISBN 3540572805

Particle Data Group 2010

PARTICLE DATA GROUP: *Particle Physics Booklet.* 7 2010

Stolarczyk 2008

STOLARCZYK, Thierry: *Antares News: Antares Detector Completed.* http://antares.in2p3.fr/News/news_DetCompleted_30May2008.html. Version: 05 2008

Thurn 2007

THURN, Andreas: *Supernova detection with the ANTARES neutrino telescope.* 10 2007

Erklärung

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

Erlangen, 23.03.2011

Bernhard Scherl