

Studien zur Positionsbestimmung der akustischen ANTARES-Stockwerke

Sebastian Brehm

12. Januar 2009



Inhaltsverzeichnis

1	Astroteilchen-Physik	5
1.1	Neutrinos	6
1.2	Energieabhängigkeit des gemessenen Flusses kosmischer Strahlung	6
1.3	Quellen hochenergetischer kosmischer Strahlung	8
2	Das ANTARES-Neutrino-Teleskop	9
2.1	Tscherenkov-Detektoren	11
2.2	Akustische Detektion von Neutrinos	12
2.2.1	Aufbau akustischer Stockwerke	15
3	Methoden der Positionierung	17
3.1	ANTARES Standard-Positionierung über Laufzeiten (Trilateration)	17
3.1.1	Schallgeschwindigkeit im Wasser	17
3.1.2	Berechnung der Weglänge aus Zeitdifferenzen	18
3.1.3	Genauerer Verlauf des Schallsignals	19
3.1.4	Positionierung über die ermittelten Distanzen	21
3.2	Positionierung über Winkelvermessungen (Triangulation)	23
3.2.1	Definition der zu minimierenden Funktion	25
3.2.2	Umrechnung von $\vec{\Omega}^*$ in Akustik-Kompass und Akustik-Tilt Daten	27
3.2.3	Simulation der Stockwerkspositionierung (Triangulation)	28
4	Richtungsrekonstruktion und Analyse von Schallsignalen durch akustische Stockwerke	30
4.1	Zeitbestimmung von Pingesignalen	34
4.1.1	Selektion von Zeitsignalen	37
4.2	Berechnung der Zeitwerte t_i	39
4.3	Bildung des Abstandsquadrates f_1	41
4.3.1	Minimierung der Funktion f_1	42
4.4	Simulation einer Richtungsrekonstruktion	43
4.5	Untersuchung realer Daten I	45
4.5.1	Verteilung der Realdaten	47
4.6	Positionsbestimmung der Hydrophone	49
4.7	Untersuchung realer Daten II	56
4.7.1	Winkelauflösung der Akustikstockwerke	60
4.8	Bestimmung der Stockwerkspositionen über Winkelvermessungen	63

4.8.1	Bestimmung der bestmöglichen Auflösung der Stockwerkspositionierung (Simulation)	63
4.8.2	Orts-, Kompass- und Tiltrekonstruktion an Realdaten	66
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	78

1 Astroteilchen-Physik

Die Astronomie ist eine der ältesten Wissenschaften. Man vermutet ihren Ursprung in einer kultischen Verehrung von Himmelskörpern. Durch Beobachtungen des Firmaments konnten schon in der Frühzeit Vorhersagen, zum Jahresablauf gemacht und Kalender erstellt werden. Ein neues Zeitalter der Astronomie begann mit der Erfindung des Teleskops im frühen 17. Jahrhundert und der folgenden Beobachtungen von Planeten durch Galileo Galilei mit einem selbst gebauten Teleskop. Die Erde stand nun nicht mehr im Mittelpunkt des Universums und die Bahnen von Planeten konnten anhand physikalischer Gesetze erklärt werden. Die Astronomie war bis ins frühe 20. Jahrhundert vor allem eine beschreibende Wissenschaft. Neue Erkenntnisse der Physik trugen dazu bei, dass man astronomische Erscheinungen besser verstand.

Die Astroteilchenphysik wird als Bindeglied zwischen der Teilchenphysik und der Astronomie angesehen. Victor Franz Hess, der die kosmische Höhenstrahlung entdeckte und 1936 dafür den Physik-Nobelpreis erhielt, gilt als dessen Begründer. Die Astroteilchenphysik soll die Informationen, die durch Untersuchung der elektromagnetischen Strahlung gewonnen wird, durch den Nachweis von Elementarteilchen kosmischer Herkunft ergänzen. Bei entsprechenden Messungen wird die Teilchenart, Richtungsinformation und Energie bestimmt.

Versucht man Quellen von geladenen Teilchen im All zu bestimmen, stößt man schnell auf das Problem, dass diese in den weitläufigen Magnetfeldern des Universums abgelenkt werden. Eine Rekonstruktion über Entstehungsort und der Richtung der kosmischen Teilchen ist daher nur bei sehr hohen Energien möglich. Eine der Hoffnungen, mehr über den Kosmos zu erfahren, beruht auf Teilchen, die fast ungehindert und ohne große Ablenkung sämtliche Bereiche des Universums durchdringen: den Neutrinos.

1.1 Neutrinos

In den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts stellten Physiker fest, dass die Energieerhaltung beim Betazerfall $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ scheinbar verletzt wurde. Um diesen Widerspruch aufzulösen, postulierte Wolfgang Pauli (1930) ein neues Teilchen. Aber erst 1956 wurde das Neutrino im Experiment *Poltergeist* [1, 2] beim inversen Betazerfall $\bar{\nu}_e + p^+ \rightarrow e^+ + n$ nachgewiesen. Heute sind 3 verschiedene Flavours von Neutrinos und ihre jeweiligen Antiteilchen bekannt: die Elektron-Neutrinos, Myon-Neutrinos und Tau-Neutrinos.

Neutrinos haben Eigenschaften, die man von anderen Teilchen nicht kennt. So bewegen sie sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit und besitzen eine verschwindend geringe Masse [3]. Zudem verändern sie über größere Distanzen ihren Flavour [4]. Für Messungen schwer zugänglich macht sie ihr äußerst kleiner Wirkungsquerschnitt. Bei Neutrino Energien zwischen $10^{16}\text{eV} \leq E_\nu \leq 10^{21}\text{eV}$ beträgt dieser etwa [5]:

$$\sigma_{tot}(\nu N) = 7.84 \cdot 10^{-36}\text{cm}^2 \left(\frac{E_\nu}{1 \text{ GeV}} \right)^{0.363}$$

Neutrinos wechselwirken mit anderen Teilchen nur durch die schwache Wechselwirkung. Ein Mensch wird pro Sekunde von etwa 10^{15} Sonnen-Neutrinos durchflogen. Nur etwa 75 pro Jahr interagieren dabei mit dem Gewebe des menschlichen Körpers.

Jeder Stern, der durch Kernfusion seine Leuchtkraft bezieht, produziert niederenergetische¹ Neutrinos in großen Mengen. Interessant für Astroteilchenphysiker sind vor allem höchstenergetische Neutrinos. Diese könnten Informationen aus bisher verborgenen Bereichen des Weltalls liefern.

1.2 Energieabhängigkeit des gemessenen Flusses kosmischer Strahlung

Auf Abbildung 1.1 wird die Energieabhängigkeit des gemessenen Flusses kosmischer Strahlung gezeigt. Diese folgt einem Potenzgesetz, welches sich mit $\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$ beschreiben lässt, wobei γ Werte zwischen 2.7 und 3 annimmt. Lange wusste man nichts über die genauen Ursachen hochenergetischer Teilchen, außer dass diese nicht thermischen Ursprungs sein mussten. Die Fermibeschleunigung, eine von Enrico Fermi 1949 vorgestellte Theorie [7], ist eine der Möglichkeiten die Verteilung zu erklären. Mit ihr können geladene Teilchen im All auf relativistische Geschwindigkeiten gebracht werden [8]. Die Fermibeschleunigung erster und zweiter Ordnung basiert jeweils auf der Annahme, dass durch ein turbulentes Plasma Magnetfelder entstehen, die für die zu beschleunigenden Partikel wie Spiegel wirken. Durch Mehrfachreflektionen wird stufenweise die Energie des Plasmas auf die Teilchen übertragen.

¹für einen Stern wie die Sonne liegen diese in der Größenordnung von MeV [6]

Der genaue Ablauf der Fermibeschleunigung und andere Fragestellungen z.B. das *injection problem*² sind Gegenstand aktueller Forschung [9].

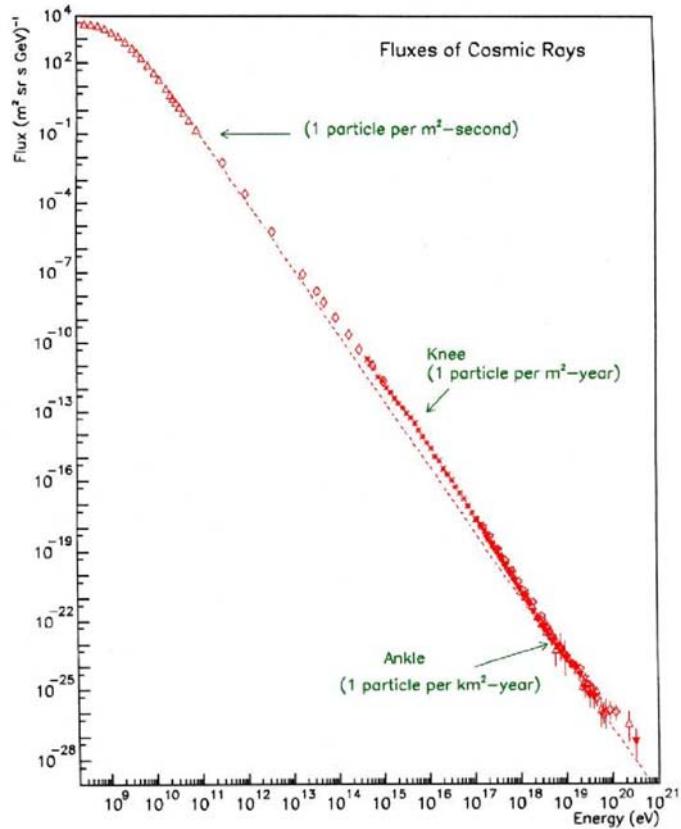
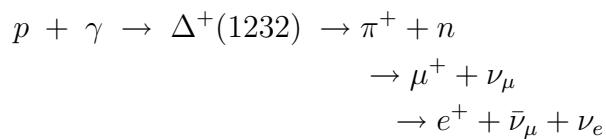


Abbildung 1.1: Energieabhängigkeit des gemessenen Flusses kosmischer Teilchen [10]

Für die Neutrinosphysik stellt sich die Frage, ob diese Verteilung auch auf Neutrinos übertragbar ist. Hier existiert ein wichtiger Mechanismus, bei dem Protonen ihre Energien über eine Reaktion und einer anschließenden Zerfallskette an Neutrinos übertragen.



Schon die Infrarot- oder Hintergrundstrahlung wäre ausreichend, um zusammen mit einem hochenergetischen Proton ein $\Delta^+(1232)$ zu erzeugen. Letzteres wurde 1966 im Zusammenhang mit dem GZK-Cutoff zum ersten Mal von den Physikern Kenneth Greisen, Georgiy Zatsepin und Vadim Kuzmin diskutiert, was eine große Bedeutung für die Energieabhängigkeit des gemessenen Flusses hätte.

²Den meisten zu beschleunigenden Partikeln fehlt die Mindestenergie für den Eintritt in den Beschleunigungsmechanismus, wobei jene weit über der der thermischen Energie liegt

1.3 Quellen hochenergetischer kosmischer Strahlung

Kandidaten für die Erzeugung höchstenergetischer Strahlung:

- **Supernova Überreste (SNR / Supernova Remnants)**

Während einer Supernova werden riesige Mengen an Neutrinos erzeugt. Eine Schockwelle, die nach einer Explosion entsteht, verbreitet sich im All. Diese erzeugt hochenergetische Neutrinos mit Hilfe der Fermi-Beschleunigung.

- **Magnetare (SGR / Soft Gamma Repeater)**

Magnetare oder Soft Gamma Repeater sind Neutronensterne mit einem extrem starken Magnetfeld. Die Größenordnung dieser Felder kann bei 10^{15} Gauß [11] liegen³. Zusammen mit ihrer extrem schnellen Rotation ($T < 10$ ms) sind diese Objekte sehr gute Kandidaten für Teilchenbeschleuniger.

- **Aktive galaktische Kerne (AGN/Active galactic nuclei)**

Aktive Galaxien gehören zu den leuchtkräftigsten Objekten des Universums und besitzen supermassive schwarze Löcher in ihrem Zentrum. Diese können Massen im Bereich einiger Millionen bis einiger Milliarden Sonnenmassen haben. Zu Objekten dieser Klasse werden Blazare, Quasare und auch Radiogalaxien gezählt, welche ihre Leuchtkraft aus der Akkretion von Materie beziehen. Verschiedene Mechanismen wie die Fermibeschleunigung im Plasma der Akkretionsscheibe oder die Jetbildung an den Polen können zur Bildung hochenergetischer Teilchen beitragen.

- **Gammablitze (GRB/ Gamma Ray Bursts)**

Gammablitze wurden zum ersten mal 1967 zufällig durch die Vela Satelliten detektiert, die zur Aufgabe hatten, den Stopp oberirdischer Kernwaffentests zu überwachen. Die Blitze dauern zwischen einigen Millisekunden bis zu mehreren Minuten und sind über hundert mal stärker als Supernovae. Ihre Energieausbrüche gehören wohl zu den stärksten, die es im Universum gibt.

- **Mikroquasare**

Diese haben in ihrem Aufbau und bei der Strahlung starke Ähnlichkeiten zu AGN. Stellare schwarze Löcher oder Neutronensterne befinden sich dabei in einem Binärsystem mit einem Stern. Sie akkretieren Materie von ihrem Begleiter, was zu heftigen Strahlungsausbrüchen führen kann.

³Zum Vergleich: Das Magnetfeld der Erde liegt am Nordpol bei etwa 0.6 Gauß

2 Das ANTARES-Neutrino-Teleskop

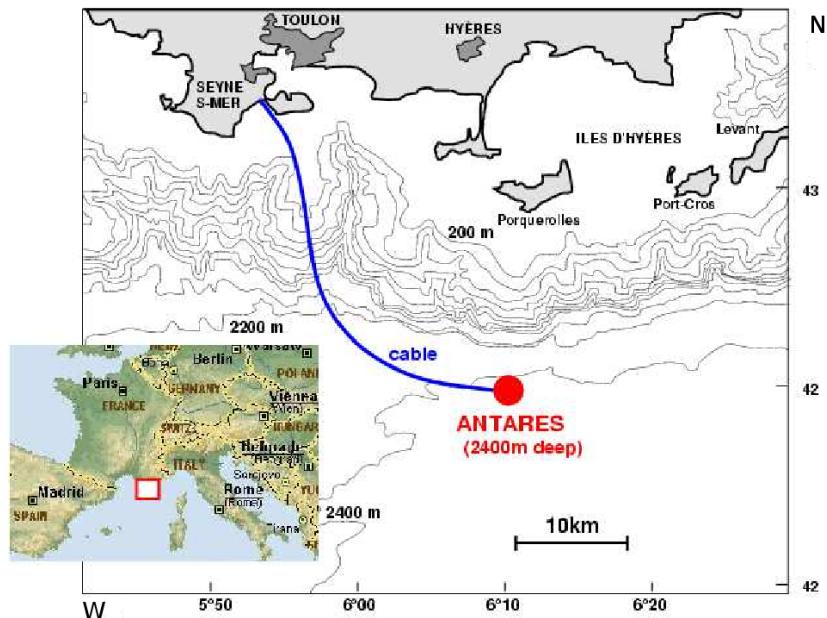


Abbildung 2.1: Standort des ANTARES Detektors

Ein aktuelles Projekt zum Nachweis von hochenergetischen Neutrinos ist ANTARES¹. Es ist eines von mehreren Tscherenkow-Neutrino-Teleskopen. Seit Mai 2008 ist es im vollen Betrieb und befindet sich in 2400 m Tiefe im Mittelmeer, knapp 40 km vor der Küste von Toulon (Frankreich). Mit Hilfe von Photomultipliern wird Tscherenkow-Strahlung detektiert. Diese entsteht, wenn sich überlichtschnelle, geladene Teilchen in einem Medium (hier: Wasser) bewegen. Neutrino-induzierte Teilchenreaktionen, im speziellen Myon-Neutrinos, auf deren Nachweis ANTARES optimiert wurde, können diese erzeugen. Als zusätzliche Komponente umfasst der Detektor einen Testaufbau zur akustischen Teilchendetektion (AMADEUS²). Ziel ist es in dieser Machbarkeitsstudie, auf Basis von Unterwassermikrofonen (Hydrofonen) Schallquellen zu detektieren, die ihren Ursprung in Teilchenreaktionen von UHE-Neutrinos³ mit Wasser haben.

Da Neutrinos mit Materie so gut wie nicht wechselwirken, muss das Teleskop ein großes Volumen aufweisen. Als Reaktionsmedium dient Meerwasser. ANTARES besitzt

¹Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch

²ANTARES Modules for Acoustic Detection Under the Sea

³Ultra High Energy: $E > 10^{18}$ eV

ein Detektorvolumen von knapp 0.01 km^3 . Zwölf Kabel (Lines), die an einem Ende am Meeresboden fixiert sind und am anderen durch Bojen auf konstanter Höhe gehalten werden, bilden das Grundgerüst für die knapp 300 optischen und 6 akustischen Stockwerke. Jeweils drei Photomultiplier, die in einem Winkel von 120° zueinander angeordnet sind, bilden pro Line eines von 25 Stockwerken. Die Basisstationen (BSS) am Meeresboden, deren Gewichte die Stränge am Boden fixieren, dienen für die Versorgung der Module. Von einer Junctionbox aus, die mit den Basisstationen zusammengeschaltet ist, führt ein einziges Seekabel an Land. Dieses versorgt ANTARES mit einer Strom- und Datenverbindung.

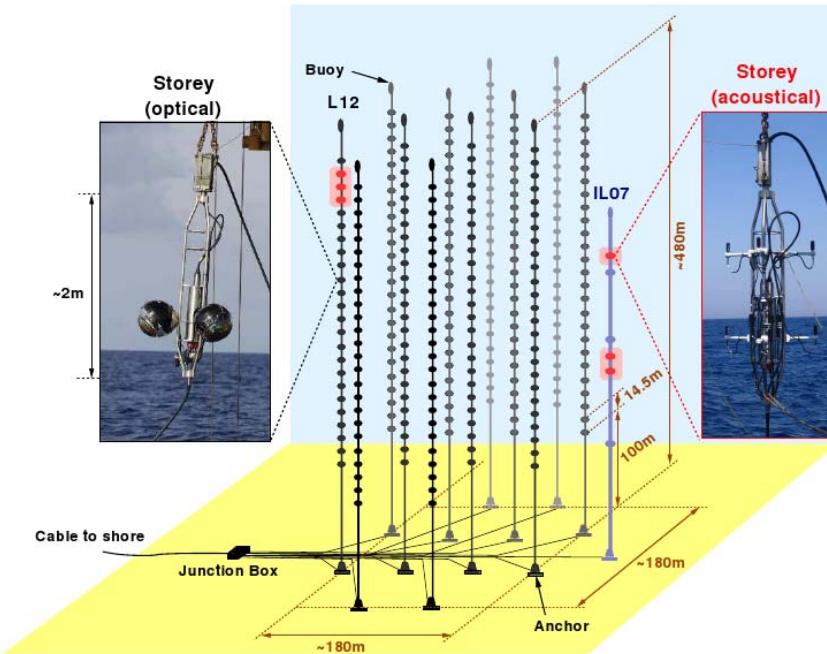


Abbildung 2.2: Schematische Ansicht von ANTARES

Die Hauptaufgaben von ANTARES sind:

- Suche nach Punktquellen kosmischer Neutrinos und Bestimmung des diffusen Neutrinoflusses aus dem Universum.
- Messung des Energiespektrums atmosphärischer Neutrinos im Bereich von einigen 10 GeV bis etwa 1 PeV.
- Suche nach Neutrinos, welche durch Annihilation von WIMPs⁴ entstanden sind. Letztere könnten sich, durch die Schwerkraft gefangen, im Zentrum der Milchstraße, der Sonne oder in der Erde befinden.

⁴Weakly Interacting Massive Particles

2.1 Tscherenkow-Detektoren

Im Folgendem soll kurz das Prinzip der optischen Neutrinosuche mit dem ANTARES-Detektor erwähnt werden. Für tiefergehende Informationen verweise ich auf entsprechende Arbeiten [12, 13].

Neutrinos kann man prinzipiell auf mehrere unterschiedliche Arten detektieren. Ein Beispiel dafür ist der Nachweis durch Tscherenkow-Strahlung. Trifft bei ANTARES ein hochenergetisches Elektron-/Myon-Neutrino auf einen Kern, so erzeugt es neben Teilchenschauern überlichtschnelle Elektronen/Myonen. Durch Polarisation des Mediums entsteht dabei ein Lichtkegel (Tscherenkow Licht), der in Abhängigkeit vom Brechungsindex des Mediums und der Teilchengeschwindigkeit einen definierten Öffnungswinkel besitzt.

Jeder Tscherenkow-Detektor muss sich, um vor Fremdlichteinfall geschützt zu sein, an einem dunklen Ort befinden. Er benötigt eine Abschirmung gegen atmosphärische Myonen⁵, die ebenso einen Tscherenkow Kegel abstrahlen. Alle Detektoren befinden sich entsprechend tief unter einer Schutzschicht aus Gestein, Wasser oder Eis.

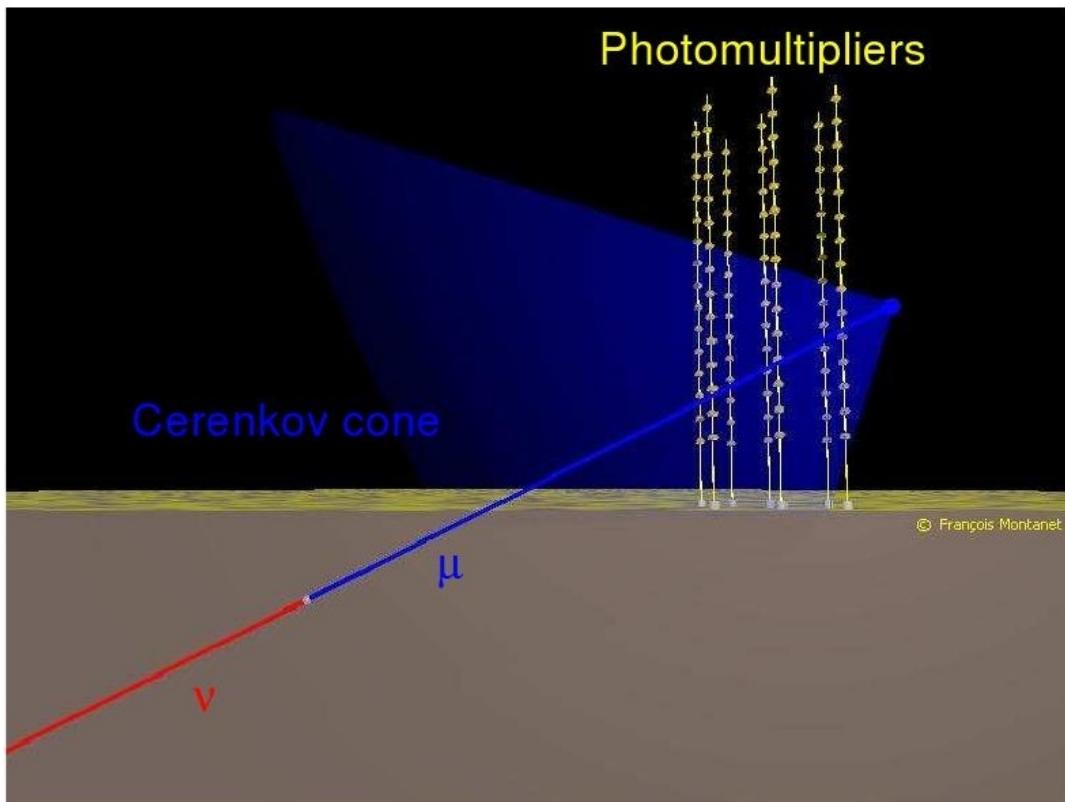


Abbildung 2.3: Ein in der Erde erzeugtes Myon wird mit Hilfe von Tscherenkow Strahlung detektiert

⁵Diese entstehen in Folge der Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit den Atomkernen der Erdatmosphäre in etwa 10 km Höhe

Da das Ziel ist, ausschließlich Neutrinos zu detektieren, wählt man als Blickrichtung die Erde. Dies hat zwei Gründe: Zum einen sind Neutrinos die einzige bekannte Teilchen, welche die Erde fast ungehindert durchdringen können. Zum anderen wird dadurch verhindert, dass atmosphärische Myonen gemessen werden. Für die Detektion von Tscherenkov-Strahlung werden Photomultiplier verwendet. Schon einzelne Photonen lösen in diesen Geräten ganze Kaskaden von Elektronen aus, welche von der Elektronik registriert werden. Durch die sehr genau vermessenen Ankunftszeiten der Tscherenkov-Strahlung, kann so auf die Einfallrichtung und die Energie des Neutrinos geschlossen werden. Je höher die Energien liegen, desto genauer lässt sich die Richtung eines Neutrinos rekonstruieren.⁶



Abbildung 2.4: optisches Stockwerk von Antares: 3 Photomultiplier im Winkel von 120° zueinander angeordnet, blicken unter 45° zum Meeresboden

2.2 Akustische Detektion von Neutrinos

Die akustische Teilchendetektion befindet sich noch im Versuchsstadium. Mit 6 akustischen Stockwerken in ANTARES soll derzeit erprobt werden, ob man mit diesem Prinzip Neutrino-physik betreiben kann. Ein Problem stellt das Auffinden weniger Neutrinosignaturen in sehr großen Datensätzen dar. Theorie und Experimente [14] legen es nahe, dass dies möglich sein sollte. Der Hauptgrund für die Forschung auf diesem neuen Feld sind Kostengründe. Für größer werdende Detektorvolumina in der Zukunft würden die Anzahl der optischen Stockwerke schnell das Budget sprengen, da die Instrumentationsdichte von der Abschwächlänge⁷ des Lichts abhängt.

⁶ANTARES: Auflösung besser als 1° möglich

⁷für Licht ≈ 50 m, für Schall ≈ 500 m bei 30 kHz

Die akustische Detektion von Teilchen basiert auf dem thermoakustischen Modell [15, 16]. Diese Möglichkeit wurde zum ersten mal 1957 von G.A. Askarian formuliert. Die Grundidee dabei ist, dass Energie (hadronischer Schauer) deponiert in einem Medium, lokal zur Erhitzung führt. Abhängig vom Ausdehnungskoeffizienten des Mediums, führt dies zu einer schnellen Expansion, die sich in Form einer Schallwelle ausbreitet. Die Form der Welle kann zu jedem Zeitpunkt und Ort mit Hilfe einer inhomogenen Wellengleichung beschrieben werden.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = \frac{\alpha}{C_p} \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} \quad (2.2.1)$$

mit:

$p(r, t)$: Schallsignal

$\epsilon(r, t)$: Energieverteilung der Kaskade

α : Ausdehnungskoeffizient von Wasser

C_p : spezifische Wärmekapazität von Wasser

c : Schallgeschwindigkeit im Wasser

Berechnet man das Kirchhoff Integral und stellt vereinfachende Annahmen über die Energieverteilung $\epsilon(r, t)$ der Kaskade an, kann man den prinzipiellen Verlauf der Wellen-Ausbreitung angeben. In Abbildung 2.5 erkennt man ein von oben kommendes Neutrino, welches einen hadronischen Schauer erzeugt. Dieser ist langgestreckt und produziert durch die Energiedeposition eine Druckwelle. Eingezeichnet sind die jeweiligen Isobaren, d.h. Bereiche gleichen Drucks. Zusätzlich ist im Bild rechts oben der bipolare Puls als Funktion der Zeit angedeutet, welcher das erwartete Schallsignal darstellt. Über den tatsächlichen Signalverlauf bestehen immer noch Unklarheiten, da man die räumliche Verteilung der Kaskade nicht genau kennt.

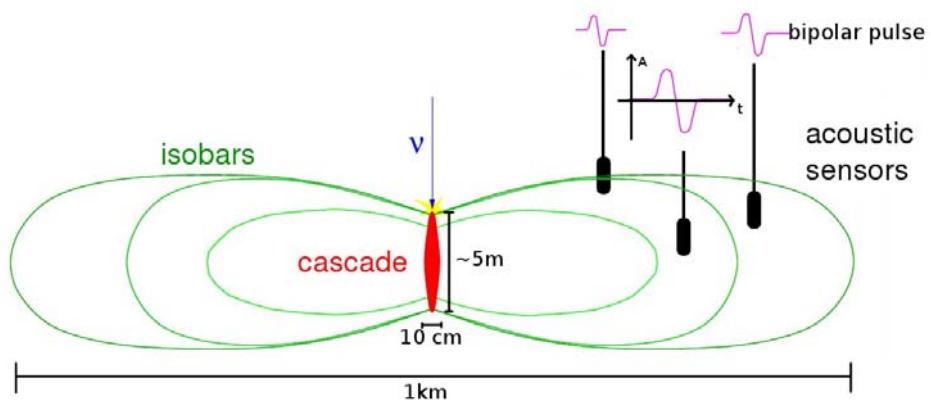


Abbildung 2.5: Prinzip der akustischen Neutrino Detektion
(nicht maßstabsgetreue Abbildung)

Die akustische Teilchendetektion hat folgende Aufgaben:

- Auffinden des hochfrequenten bipolaren Pulses im Datensatz
- Suche nach dem Ort und Orientierung des hadronischen Schauers
- Bestimmung der Neutrinoenergie

Um in der Praxis das Signal als Neutrinosignal zu identifizieren, müssen effiziente Triggeralgorithmen geschrieben werden, die das Rauschen wegfürtern, aber potentielle Neutrinosignaturen erkennen. Manche Meereslebewesen, z.B. Delphine, produzieren ähnliche Signale. Die Software muss die Unterschiede berücksichtigen, so dass diese Störsignale erkannt werden.

Die akustische Richtungsrekonstruktion ist bei vielen technischen Anwendungen Standard. Ein durch einen hadronischen Schauer ausgelöstes Signal hat anfangs eine festgelegte Form. Diese Form ändert sich während der Ausbreitung aufgrund der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeiten vom Wasserdruck bzw. der Wassertiefe. Dieses "Verbiegen" der akustischen Signale im Ausbreitungsmedium erschwert die Richtungsrekonstruktion.

Eine genaue Bestimmung der Orientierung des hadronischen Schauers oder Analyse der Neutrinoenergie, wird derzeit mit AMADEUS noch nicht versucht. Diese Aufgaben werden erst angegangen, wenn die zuvor genannten Punkte zufriedenstellend gelöst sind.

2.2.1 Aufbau akustischer Stockwerke

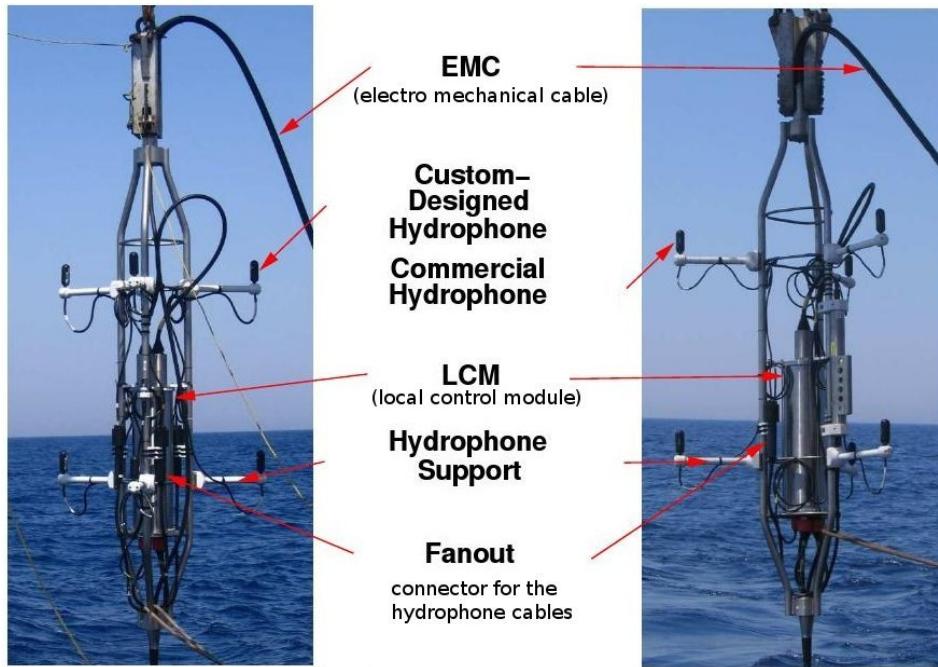


Abbildung 2.6: Aufbau eines akustischen Stockwerks

Für den Bau der akustischen Stockwerke verwendete man so weit wie möglich Standardkomponenten (z.B das Gerüst optischer Stockwerke). Ziel war es, möglichst nur getestete Komponenten zu benutzen, wodurch sich der Konstruktionsaufwand in Grenzen hielt. Es existieren außerdem unterschiedliche Aufbauten von akustischen Stockwerken, damit verschiedene Testumgebungen geschaffen werden konnten. Beispielsweise wurden kommerziell verfügbare Hydrophone auf der einen mit selbst gebauten auf der anderen Seite kombiniert. Die Hydrophone sind im 120° Winkel zueinander versetzt angeordnet, wobei sich jeweils direkt übereinander angeordnet, drei oben und drei unten befinden⁸. Durch diese Anordnung ist es möglich, die Richtungsrekonstruktionen für jedes einzelne Stockwerk dreidimensional durchzuführen. Die Hydrophone sind zusammen mit der Elektronik (LCM) in der Lage, Ultraschallsignale bei einer Samplingfrequenz von bis zu 250 kHz aufzuzeichnen und zu übermitteln.

Einige Teile der Elektronik mussten für die Akustik neu angepasst und entwickelt werden. Hier wurden die ARS Boards⁹, welche für die Auslese und Digitalisierung der Daten von Photomultipliern (PMT) bei optischen Stockwerken dienen, durch Acoustic-ADC Boards ersetzt. Deren neue Aufgabe ist die Verstärkung und Digitalisierung der Eingangssignale der Hydrophone.

Die optischen wie auch die akustischen Stockwerke besitzen zur Orientierung einen

⁸Ausnahme ist das akustische Modul auf Line 12

⁹acoustic ring sampler

Kompass und Tiltmeter. Der Kompass liefert Informationen über die Verdrehung eines festgelegten Bezugspunktes im Stockwerk zum geographischen Nordpol, das Tiltmeter die Verkipplungsrichtungen.

3 Methoden der Positionierung

ANTARES besteht nicht aus einem starrem Gerüst, sondern die Lines (siehe Abbildung 2.2) an denen die Stockwerke befestigt sind, können sich frei in der Meeresströmung bewegen. Eine gute Rekonstruktion des Tscherenkow-Kegels ist nur möglich, wenn die Stockwerkspositionen und deren Verdrehungen hinreichend genau bekannt sind. Aus diesem Grund müssen diese regelmäßig neu vermessen werden. Man entschied sich bei der Planung von ANTARES für ein Positionierungssystem mittels akustischer Signale, das über Laufzeiten die Raumkoordinaten einzelner Stockwerke ermittelt.

3.1 ANTARES Standard-Positionierung über Laufzeiten (Trilateration)

An jeder BSS befindet sich ein akustischer Signalgeber (Pinger), welche im Ultraschallbereich zwischen 44 kHz und 65 kHz in regelmäßigen Abständen und in definierter Reihenfolge kurze Signale senden. Mit jeweils 5 einzelnen Hydrophonen pro Line ergeben sich über Signallaufzeiten die interpolierten Koordinaten der 25 optischen Stockwerke. Die Bestimmung der Orientierung jedes Stockwerks erfolgt wiederum über einzeln eingebaute Kompass und Neigungsmesser (Tiltmeter) in den LCMs.

3.1.1 Schallgeschwindigkeit im Wasser

Um die Position eines Stockwerks berechnen zu können, muss die Schallgeschwindigkeit in der jeweiligen Wassertiefe bekannt sein. Ein typisches Beispiel für das Geschwindigkeitsprofil von Schall im Meerwasser ist auf Abbildung 3.1 zu sehen. Erkennbar ist zum einen der große Wert der Schallgeschwindigkeit von etwa $1500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und zum anderen deren Tiefenabhängigkeit.

Die Geschwindigkeit wird maßgeblich von der Dichte des Wassers beeinflusst. Diese ist wiederum von den Salzkonzentration, der Temperatur und dem Druck abhängig [17]. Bei einer konstanten Salzkonzentration und Temperatur von 13.2°C [18], wie sie im Mittelmeer im Bereich von ANTARES herrscht, ist der bestimmende Faktor für die Schallgeschwindigkeit der Tiefendruck. Sei die z-Koordinate positiv vom Meeresboden zur Meeresoberfläche orientiert, so gilt in erster Näherung für die Geschwindigkeit:

$$c(z) = c_s + k_c \cdot z \quad (3.1.1)$$

Dabei sei c_s die zu messende Geschwindigkeit am Meeresboden an einem festem Ort, der per Definition auf der Höhe $z=0$ liegen soll und $k_c = -0.0165 \frac{m}{s} \cdot \frac{1}{m}$ der (negative) Geschwindigkeits-Gradient [19].

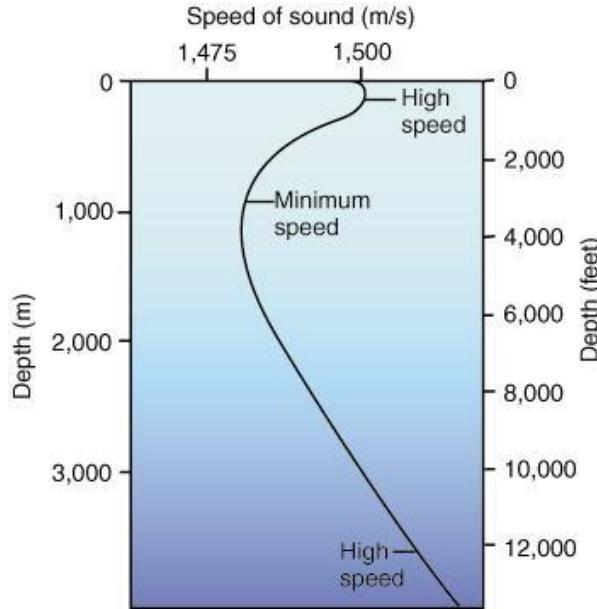


Abbildung 3.1: typisches Tiefenprofil der Schallgeschwindigkeit im Meerwasser
Quelle <http://www.punaridge.org>

3.1.2 Berechnung der Weglänge aus Zeitdifferenzen

Für die zurückgelegte Zeit eines akustischen Signals gilt:

$$\Delta t = \int_{P_0}^{P_1} \frac{ds}{c(s)} \quad (3.1.2)$$

Um eine Näherung für dieses Integral zu erhalten, entwickelt man $\frac{1}{c(z)}$ um $z = 0$ in einer Taylor Reihe erster Ordnung. Die Variablen s und z stehen dabei in einem festen Verhältnis K zueinander, was die Annahme einer geradlinigen Ausbreitung des Signals impliziert.

$$\Delta t = \frac{s_1 - s_0}{z_1 - z_0} \int_{z_0}^{z_1} \frac{1}{c_s} dz - \frac{zk_c}{c_s^2} dz \quad \leftarrow ds = K \cdot dz \quad \leftarrow s = K \cdot z \quad (3.1.3)$$

Für die Distanz ergibt sich somit:

$$\Delta s = \frac{\Delta t \cdot c_s}{1 - \frac{k_c}{2c_s}(z_0 + z_1)} \quad (3.1.4)$$

Um die Länge Δs zu ermitteln, benötigt man darum neben der Laufzeit gleichzeitig die z-Koordinaten der Signalquelle und des Hydrophons¹.

¹Die Größenordnung vom Term $-\frac{k_c}{2c_s}(z_0 + z_1)$ liegt bei einem Stockwerk von 420 m bei grob ≈ 0.002

3.1.3 Genäherter Verlauf des Schallsignals

Als direkte Anwendung kann man die Schallausbreitung von einem am Boden ($z_0 = 0$) liegendem Objekt graphisch darstellen.

Mit den Vereinfachungen $s := \Delta s$, $z := z_1$ und $t := \Delta t$ gilt in Polarkoordinaten:

$$z = s(z, t) \cdot \sin(\phi) \quad (3.1.5)$$

Nach z aufgelöst ergibt sich:

$$z_I = \frac{c_s}{k_c} \cdot (1 - \sqrt{1 - 2 k_c t \sin(\phi)})$$

$$z_{II} = \frac{c_s}{k_c} \cdot (1 + \sqrt{1 - 2 k_c t \sin(\phi)})$$

Für diesen Fall ist $z = z_I$ die einzige physikalisch sinnvolle Lösung, da z_{II} hohe negative Werte annimmt ($k_c < 0$)

Somit gilt in Polarkoordinaten für die Radialkomponente s :

$$s(\phi, t) = \frac{z_I}{\sin(\phi)} = \frac{c_s \cdot (1 - \sqrt{1 - 2 k_c t \sin(\phi)})}{k_c \sin(\phi)} \quad (3.1.6)$$

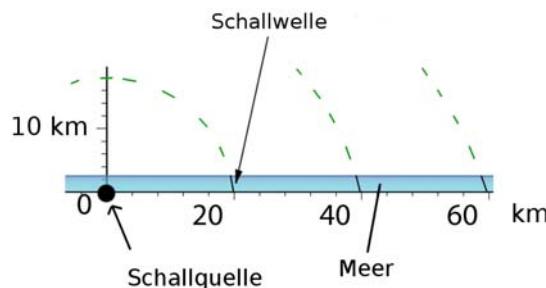


Abbildung 3.2: Schallwellenausbreitung am Meeresboden (schwarz).
(Die grün gestrichelten Linien deuten den theoretischen Kurvenverlauf an, um das Verbiegen der Welle besser als solche zu erkennen)

Kritikpunkte an Gleichung 3.1.6:

- Befindet man sich nicht mehr in großen Tiefen, sondern in oberen Schichten (siehe Abbildung 3.1) gilt Gleichung 3.1.1 nicht mehr
- Die Gleichung 3.1.4 basiert auf einer geradlinigen Ausbreitung des Schalls
- Die Gleichung 3.1.4 ist in einem begrenzten Bereich gültig, da in der Taylor-Reihenentwicklung nur die erste Ordnung berücksichtigt wurde

Dennoch kann man mit der Radialkomponente 3.1.6 und den daraus folgenden Polarkoordinaten den prinzipiellen Verlauf der Wellenausbreitung beschreiben, da Schallsignale durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten nach oben verbogen werden. Für relativ kleine Distanzen zur Quelle hin (mehrere 100 m) sollten sich die gerade eben genannten Fehler in Grenzen halten.

Die Annahme von Kugelwellen, liefert nur bei kleineren Distanzen für die Richtungsrekonstruktion gute Ergebnisse. Bei größeren Weglängen macht sich der Fehler stärker bemerkbar. Bei der Rekonstruktion von Neutrinoereignissen muss dies später berücksichtigt werden. So beträgt er bei der Richtungsrekonstruktion eines Pingersignals, wo Distanzen² im Bereich von etwa 300 m gemessen werden, einige Dezimeter. Berechnen lässt sich die Abweichung a mit Hilfe des Sinussatzes und unter Zuhilfenahme von Zylinderkoordinaten:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\frac{-dr}{d\Phi}}{\frac{dz}{d\Phi}} \right) = \arctan \left(\frac{\frac{-d}{d\Phi} [s(\Phi, t) \cdot \cos(\Phi)]}{\frac{d}{d\Phi} [s(\Phi, t) \cdot \sin(\Phi)]} \right) \quad (3.1.7)$$

Sinussatz:

$$a = b \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} \quad (3.1.8)$$

mit:

$$\alpha = |\Phi - \varphi|$$

$$\beta = 180^\circ - \varphi$$

b = Distanz des Pingers zum Akustikstockwerk

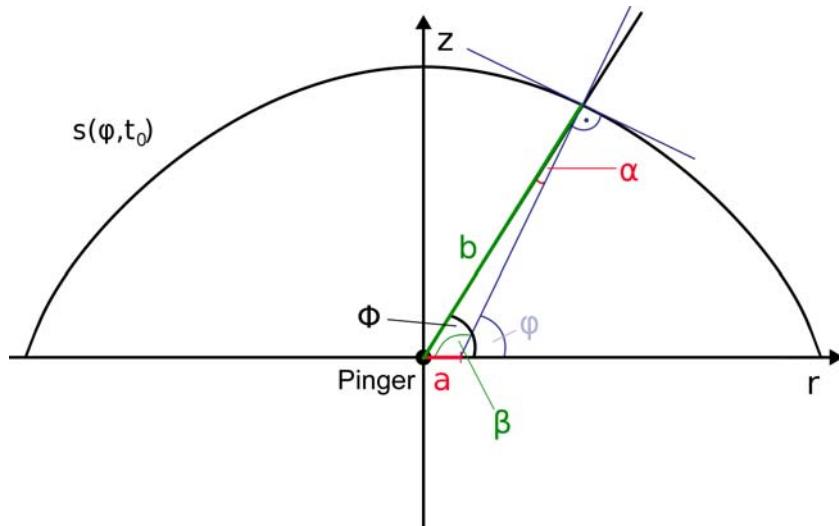


Abbildung 3.3: Fehler der Richtungsrekonstruktion durch die Verzerrung der Wellenfront

²Stockwerk 2 Instrumentation Line

Tabelle 3.1: Mit Maple berechnete Fehler der Rekonstruktion von einigen Pingern für das Stockwerk 2. Die Pinger und das 180 m über dem Meeresboden liegende Stockwerk sind auf Abbildung 4.1 zu sehen

Pinger	Φ	b	φ	α	a
1	72°	184 m	72.0175°	0.0175°	0.0591 m
6	52°	223 m	52.0424°	0.0424°	0.2093 m
12	37°	288 m	37.0710°	0.0710°	0.5920 m

3.1.4 Positionierung über die ermittelten Distanzen

Für eine Positionierung eines einzigen Hydrophons bedarf es mathematisch 4 Streckenlängen, wobei die Pinger linear unabhängig voneinander angeordnet sein müssen. Stehen nur 3 Pinger zur Verfügung, existiert eine zusätzliche Spiegellösung welche bei einer Anordnung, wie sie bei ANTARES vorhanden ist, unter dem Meeresboden liegt. Da diese Lösung unphysikalisch ist, reichen 3 Pinger zur Positionierung aus. Um sich die Lösung bildlich (siehe Abbildung 3.4) vorzustellen, kann man sich um jeden Pinger eine Halbkugel denken, welchen den Radius $r_i = c \cdot t_i$, mit der Laufzeit t_i , besitzt. Der Schnittpunkt dieser Halbkugeln ergibt die Position des Hydrophons.

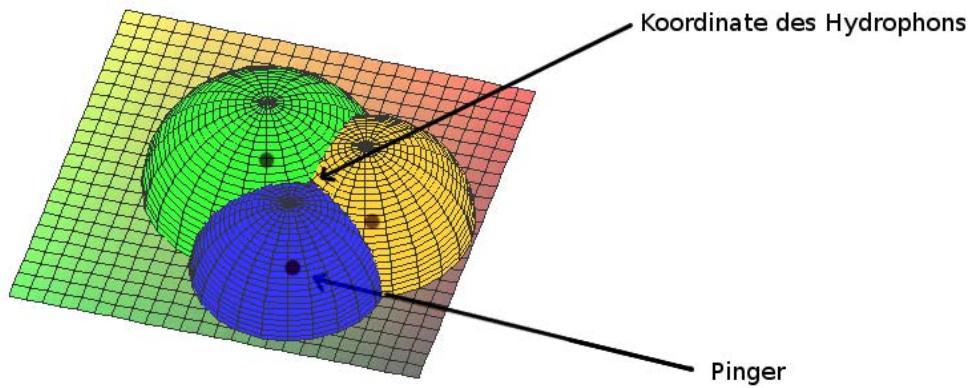


Abbildung 3.4: Lösung der Positionsbestimmung ist der Schnittpunkt aller drei Halbkugeln

In der Regel sind mehr als 3 Pingesignale vorhanden. Diese zusätzliche Information kann man benutzen, um die Genauigkeit zu verbessern. Zur Bestimmung der Position eines Hydrophones gilt folgende Ausgangsgleichung:

$$f := \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_i(z', t_i) - D_i(x', y', z')}{\Delta s_i} \right)^2 \quad (3.1.9)$$

n : Anzahl der Pinger

x', y', z' : geschätzte Position des Hydrophones

$s_i(z', t_i)$: aus den Zeiten t_i gewonnenen Weglängen

$D_i(x', y', z')$: Weglänge des Hydrophones zum i -ten Pinger

Δs_i : Fehler der Längenmessung zum i -ten Pinger

Ist die Lösung gefunden, nimmt die Funktion f einen Minimalwert an. Die Berechnung erfolgt über einen Minimierungsalgorithmus³. Die Positionierung der Hydrophone auf den Akustik-Stockwerken erfolgt, wie bei den optischen, über Laufzeiten. Das hat zusätzlich den Vorteil, dass über 6 Hydrophone die Orientierung des Stockwerks bestimmt werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wird aber nun ein anderer Ansatz verfolgt, der im Folgenden beschrieben werden soll.

³z.B. MIGRAD

3.2 Positionierung über Winkelvermessungen (Triangulation)

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, eine Positionierung der Akustik-Stockwerke über Winkelmessungen zu erhalten. Dazu wird keine Information über die Startzeitpunkte der Pinger benötigt, sondern nur über die Zeitdifferenzen innerhalb eines Stockwerks. Um durch Winkelmessungen die Ausrichtung und den Ort des eigenen Standpunktes zu bestimmen, benötigt man zunächst die Information von welchen Koordinaten das Signal stammt. Dann ist über mehrere gemessene Winkelpaare (φ_i, ϑ_i) die Position und Ausrichtung des Stockwerks bestimmbar (siehe Abbildung 3.5).

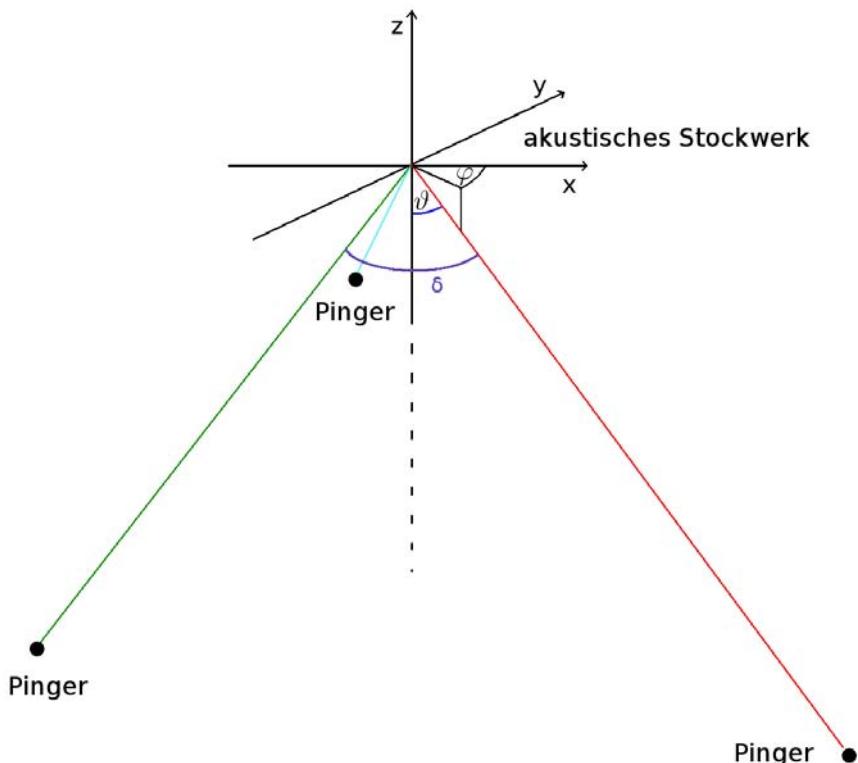


Abbildung 3.5: Prinzip der Positionierung des akustischen Stockwerkes über Triangulation

Dazu gibt es mehrere Verfahren. Auf Abbildung 3.5 ist neben φ und ϑ der Winkel δ eingezeichnet, der Winkel zwischen zwei an kommenden Schallquellen. Die verschiedenen δ_i , sofern mehr als zwei Pinger vorliegen, hängen von der aktuellen Position des Stockwerkes ab. Mit Hilfe von Fasskreisbögen, einem Begriff aus der Geometrie, kann man in zwei wie auch in drei Dimensionen Lösungen konstruieren. Fasskreisbögen bestehen aus einem Kreisbogen und einer eingezeichneten Sehne, welche diesen begrenzt. Diese Sehnenstrecke erscheint allen Punkten auf dem Bogen unter dem selben Winkel⁴. Im

⁴der bekanntere Thaleskreis ist ein Spezialfall des Fasskreisbogens

zunächst vereinfachtem zweidimensionalen Fall kann man mit dieser Kenntnis die Position eines Stockwerkes konstruieren. Angenommen es wären die Winkel $\delta_{1/2}$ von zwei linear abhängig angeordneten Schallquellen bekannt, so kann man die zwei möglichen Lösungen durch den Schnittpunkt jeweils zweier Fasskreise finden (siehe Abbildung 3.6). Stellt man Zusatzforderungen wie beispielsweise positive y-Werte, oder sind die drei Pinger linear unabhängig, wird die Lösung eindeutig.

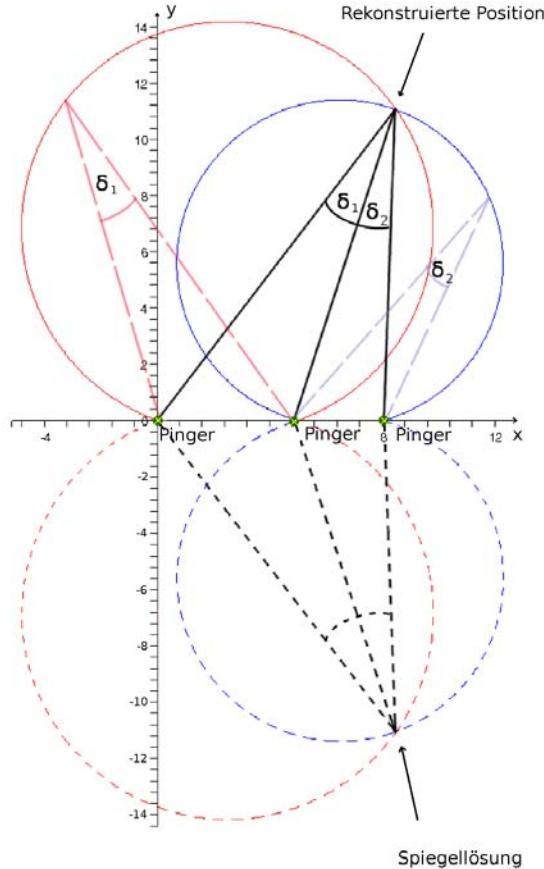


Abbildung 3.6: Konstruktion der Lösung mit Hilfe von Fasskreisbögen

Auf Abbildung 3.7 ist die selbe Anordnung wie auf Abbildung 3.6 zu sehen. Zusätzlich eingetragen sind die möglichen Positionen des Stockwerkes bei einer Winkelunsicherheit von jeweils $\Delta\delta_{1/2} = \pm 1^\circ$. Die Größe der grünen Fläche, gibt den Fehler an. Dieser wächst bei gleicher Winkelunsicherheit schnell mit zunehmend kleineren Winkeln $\delta_{1/2}$.

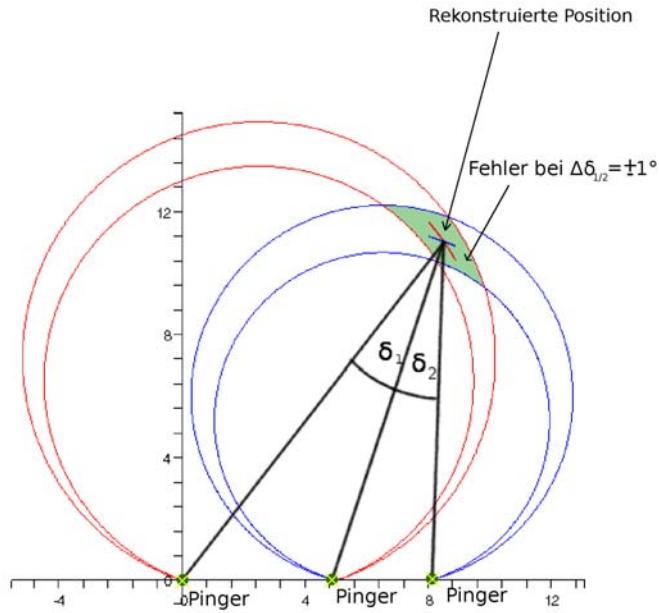


Abbildung 3.7: Fehler (grün) der Ortsrekonstruktion bei $\pm 1^\circ$ Ungenauigkeit der $\delta_{1/2}$

Im dreidimensionalem Fall nimmt der Fasskreisbogen nun die Form eines um die Sehne rotierten Fasskreises an, die als Drehachse dient. Jede der Sehnen verbindet die Pinger untereinander. Der gemeinsame Schnittpunkt mehrerer⁵ solcher rotierter Fasskreisbögen ergibt eine Lösung. Diese Vorüberlegung dient im wesentlichen dazu eine bildliche Vorstellung von der Rekonstruktion und vom Fehler zu bekommen. Nicht eingegangen bisher sind jedoch die Verdrehungen des Stockwerkes, als auch die Möglichkeit eine große Anzahl von Pingern zu benutzen. Für eine rechnerische Positionsbestimmung ist diese Methode darum im Vergleich zum folgenden Verfahren im nächsten Kapitel unterlegen.

3.2.1 Definition der zu minimierenden Funktion

Sind die Herkunftsrichtungen der Pinger im Koordinatensystem des Stockwerks bekannt, kann man über eine Triangulation die 6 Parameter des Stockwerks (Position des Schwerpunktes und Eulerwinkel der Verdrehung im ergebundenem Koordinatensystem) bestimmen. Am besten definiert man anfangs zunächst ein Stockwerk, welches sich nicht verdrehen und verkippen kann. Dann existiert eine reale Position⁶ \vec{X} des Stockwerkes, von dem aus entsprechende Vektoren \vec{w}_i zu den einzelnen i -ten Pingern zeigen. Zusätzlich soll es eine geschätzte Stockwerksposition \vec{X}^* geben, von dem aus die Vektoren \vec{v}_i zu den einzelnen Pingerpositionen gerichtet sind. Würden alle realen Vektoren den geschätzten entsprechen, d.h. $\vec{w}_i = \vec{v}_i$, wäre $\vec{X} = \vec{X}^*$ und damit die Position lokalisiert.

⁵Es müssen mindestens 4 linear unabhängige Pinger für eine eindeutige Lösung vorhanden sein

⁶Ursprung des Stockwerkkoordinatensystems

Im nächsten Schritt lässt man 3-dimensionale Verdrehungen des Stockwerkes in Eulerwinkeln⁷ $\vec{\Omega}$ zu. Stimmen auch hier die Vektoren \vec{w}_i und \vec{v}_i überein, hat man das Ergebnis $\vec{\Omega} = \vec{\Omega}^*$ der realen Ausrichtung des Stockwerks gefunden.

Das Problem ist nun, dass die Vektoren \vec{w}_i nicht vollständig bekannt sind, sondern nur die Richtungen $\hat{\vec{w}}_i$ mit $|\hat{\vec{w}}_i| = 1$. Die Länge von $|\vec{w}_i|$ kann man abschätzen, indem man definiert $|\vec{w}_i| = |\vec{v}_i|$. Dies stimmt umso mehr, je mehr die geschätzte Lösung sich der realen annähert. Deshalb wird definiert:

$$g(\vec{X}, \vec{\Omega}, \vec{X}^*, \vec{\Omega}^*) = \sum_{i=1}^n (\hat{\vec{w}}_i \cdot |\vec{v}_i| - |\vec{v}_i|)^2 \quad (3.2.1)$$

Das Minimum von g entspricht der Lösung der Ortsrekonstruktion.

⁷Definition der Eulerwinkel: siehe Kapitel 3.2.2

3.2.2 Umrechnung von $\vec{\Omega}^*$ in Akustik-Kompass und Akustik-Tilt Daten

$\vec{\Omega}^*$ wird definiert durch die Eulerwinkel, welche die Verdrehungen der \vec{v}_i charakterisieren. Die erste Koordinate beschreibt die Verdrehung um die z -Achse, die zweite eine anschließende Verkippung um die x -Achse und die letzte wieder eine Verdrehung um die z -Achse. Erhält man nach der Minimierung eine Lösung für den Vektor $\vec{\Omega}^*$, beschreibt dieser mit der Eulermatrix die neue Abbildung der Vektoren v_i . Bei der Interpretation ist darauf zu achten, dass nicht das Stockwerk, sondern die Winkel der Ankunftsrichtungen verdreht wurden. Das bedeutet, dass die Verdrehung $\vec{\Omega}^*$ genau gegenläufig zur Stockwerksverdrehung $(-\vec{\Omega}^*)$ ist. Ziel ist es nun daraus die Orientierung des Stockwerks zu bestimmen.

Die Addition der Komponenten $-(\Omega_1^* + \Omega_3^*)$ um die z -Achse entspricht nur bei kleinen Ω_2 genähert dem Kompasswinkel. Darum werden zwei Einheitsvektoren \vec{e}_1 und \vec{e}_2 im rechten Winkel zueinander in das Stockwerk gelegt (siehe Abbildung 3.8), deren Lagen nach der Verdrehung bestimmt werden. Für die Definition der Tilt und Kompassdaten soll gelten:

$$\vec{e}_1 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_2) \cdot \cos(\alpha_1) \\ \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) \\ \sin(\alpha_2) \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{z,x',z''}(-\vec{\Omega}^*) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.2.2)$$

$$\vec{e}_2 = \begin{pmatrix} \dots \\ \dots \\ \sin(\alpha_3) \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{z,x',z''}(-\vec{\Omega}^*) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.2.3)$$

mit:

$$\mathbf{M}_{z,x',z''}(\vec{\Sigma}) := \begin{pmatrix} \cos(\Sigma_3) & -\sin(\Sigma_3) & 0 \\ \sin(\Sigma_3) & \cos(\Sigma_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Sigma_2) & -\sin(\Sigma_2) \\ 0 & \sin(\Sigma_2) & \cos(\Sigma_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\Sigma_1) & -\sin(\Sigma_1) & 0 \\ \sin(\Sigma_1) & \cos(\Sigma_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Eulermatrix in der z, x', z'' Konvention

α_1 : Akustik-Kompass

α_2 : Akustik-Tilt 1

α_3 : Akustik-Tilt 2

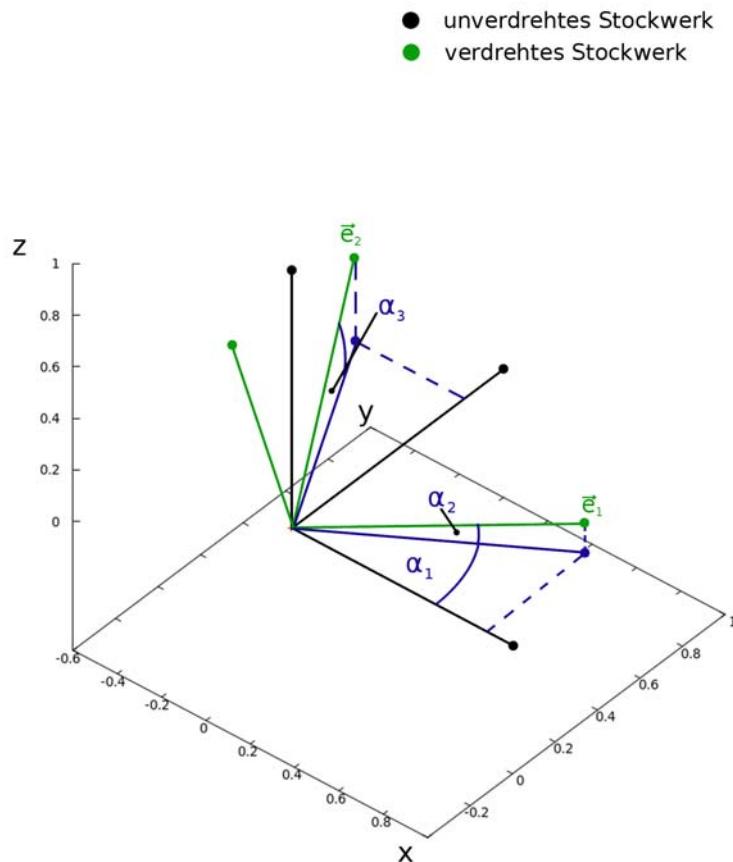


Abbildung 3.8: Definition der Winkel α_i im verdrehten Stockwerk

3.2.3 Simulation der Stockwerkspositionierung (Triangulation)

Zusammen mit den nominal angegebenen Pingerkoordinaten bei ANTARES, wurden in der Simulation die Positionen \vec{X} und Verdrehungen $\vec{\Omega}$ des Stockwerkes über einen Zufallsgenerator vorgegeben. Die daraus berechneten Vektoren \vec{w}_i , welche keine Winkelunsicherheit besaßen, lieferten die Werte für die angehenden Rekonstruktionen. Da es keinen Sinn macht, jede erdenkliche Position und Verdrehung des Stockwerkes im Raum zu berechnen, es jedoch ein gewisses Interesse daran gibt, wie weit man gehen kann, lagen die Zufallswerte von \vec{X} maximal 200 m in jeder Raumrichtung von der Standardposition des Stockwerks entfernt⁸. Die Zufallswerte für die Euler Winkel Ω_1 und Ω_3 bewegten sich im Bereich von 0° bis 360° . Der Winkel Ω_2 für die Verkipfung des Stockwerks zuständig, lag maximal im Bereich von $\pm 20^\circ$.

⁸Standardposition von Stockwerk 2: 180 m direkt über dem Pinger der IL07 (siehe Abbildung 4.1)

Die Simulation benutzte zur Rekonstruktion zwischen 3 und 13 Pinger. Dabei wurden jeweils 20 000 zufällige Orte und Richtungen rekonstruiert. Als Startwert von MIGRAD wurde die Standardposition angegeben. Das Ergebnis ist, dass ohne Winkelunsicherheit⁹ die Bestimmung des Ortes und der Richtung problemlos möglich sind. Um die Stockwerke zu rekonstruieren, ist also eine möglichst genaue Richtungsrekonstruktion akustischer Signale nötig. Wie Richtungsrekonstruktionen akustischer Signale erfolgen, wird im nächsten Kapitel behandelt.

⁹Die Simulation mit einer Winkelunsicherheit ist problemlos möglich. Auf diese wird jedoch in Kapitel 4.8.1 näher eingegangen.

4 Richtungsrekonstruktion und Analyse von Schallsignalen durch akustische Stockwerke

Auf Abbildung 4.1 sind die akustischen Stockwerke zusammen mit dem Grundriss von ANTARES und der Pyramide zu sehen. Eines der Ziele der akustischen Teilchendetektion ist es den Ort der Schallquelle zu rekonstruieren. Das Signal wird hierbei von mehreren Stockwerken gleichzeitig detektiert. Über Richtungsrekonstruktionen der einzelnen Stockwerke und anschließender Peilung kann der Ort der Schallquelle ermittelt werden.

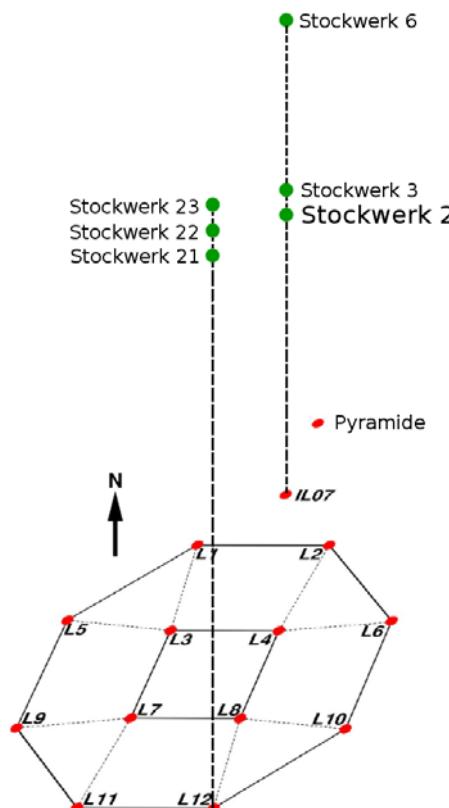


Abbildung 4.1: Grundriss von ANTARES mit den Basisstationen und der Pyramide.
Die akustischen Stockwerke befinden sich auf der IL07 und auf Line 12

Eine der Möglichkeiten die existieren, Richtungen von Schallquellen zu rekonstruieren ist das Beamforming. Das Verfahren wird in der Akustik schon seit längerem bei der

Untersuchung von Geräuschquellen angewandt. Beispiele hierfür sind die Lokalisierung von Lärmquellen bei Autos und Flugzeugen, oder die Ortung von U-Booten. Ein Array von im Raum angeordneten Mikrofonen zeichnet Schall auf. Bei der Datenverarbeitung kommt es in einer bestimmten “Blickrichtung”, der Herkunftsrichtung der Quelle, zu einer additiven Verstärkung der von dort aufgenommenen Signale. Ein Nebeneffekt bei mehreren Mikrofonen ist die Reduzierung des weißen Rauschens. Dadurch verbessert sich das Signal zu Rauschverhältnis bei M Mikrofonen mit der M -ten Wurzel [20].

Das Ausgangssignal $b(\vec{k}, t)$ beim Beamforming ist definiert als [21]:

$$b(\vec{k}, t) = \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m(\vec{k})) \quad (4.0.1)$$

Dabei sind die w_m Gewichtungsfaktoren, in denen sich die Richt-Charakteristika der einzelnen Mikrofone wiederspiegeln, p_m die Ausgangssignale jedes einzelnen Mikrofons und $\Delta_m(\vec{k})$ die zu berechnenden, richtungsabhängigen Zeitunterschiede.

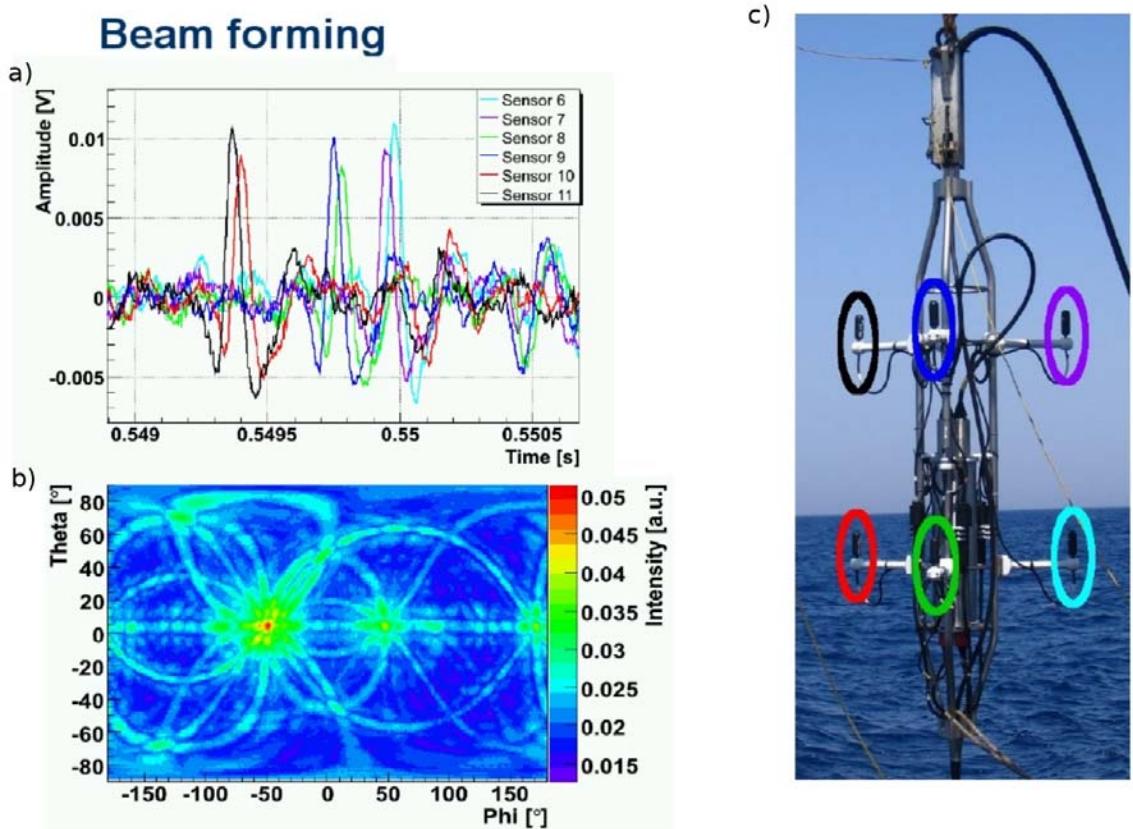


Abbildung 4.2: Richtungsrekonstruktion eines transienten Signales durch Beamforming [22]

Auf Abbildung 4.2 a) ist das mit Stockwerk 6 aufgenommene transiente¹ Signal mit den zeitversetzten Ankunftszeiten zu sehen. Die Farben codieren dabei die einzelnen Hydrophone, wie sie in c) abgebildet sind. Anhand der Laufzeitunterschiede zweier direkt übereinander liegender Hydrophone ist sichtbar, dass die Quelle knapp über der horizontalen Ebene liegen muss. In b) wird der daraus erzeugte Intensitätsplot durch Beamforming gezeigt. Die wahrscheinlichste Richtung des Signales kommt aus dem Bereich mit höchster Intensität (roter Punkt). Dieser liegt in Kugelkoordinaten bei etwa $(-50^\circ, 5^\circ)$. Die bogenartigen Strukturen sind hierbei auftretende Nebenmaxima welche nicht der Lösung entsprechen.

Beamforming ist sehr rechenintensiv, da hier für jede Blickrichtung die Zeitdifferenzen ermittelt und anschließend das Signal $b(\vec{k}, t)$ für diese Richtung berechnet werden muss. Bei einer 1° Auflösung sind das grob 65000 zu berechnende Punkte. Bei einem großen Signal zu Rausch Verhältnis ist es effektiver, Richtungen auf eine andere Art zu bestimmen. Die Idee dabei ist, auf das Signal zu triggern, d.h. Zeitdifferenzen ex-

¹impulsartiges Signal mit sehr schnellem Einschwingvorgang

akt zu vermessen und daraus die Richtungen zu berechnen. Alle folgenden Beispiele von aufgenommenen Pingesignalen, bis hin zu den Richtungsrekonstruktion, werden am Stockwerk 2 demonstriert.

4.1 Zeitbestimmung von Pingersignalen

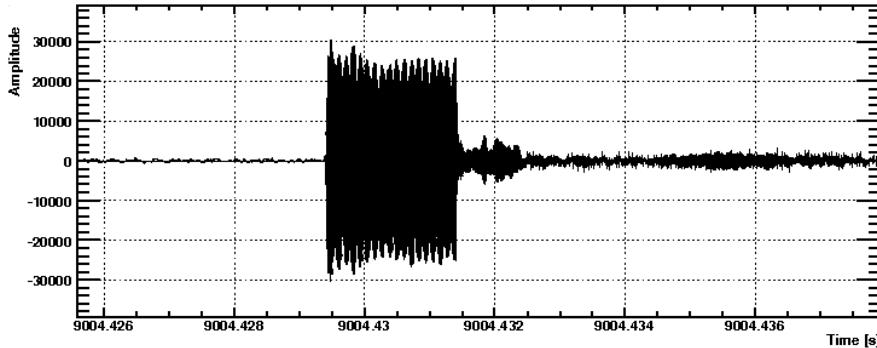


Abbildung 4.3: typisches Pingersignal, in der Nähe des Sättigungsbereiches

Die Erkennung der Pingersignale erfolgte jeweils im Rohdatenformat von AMADEUS dem ADC-Count Modus. Dies ist möglich, da zur Identifikation eines Pingers die Angabe des Schalldrucks in Pascal nicht notwendig ist. In diesem Modus werden die analogen Amplitudensignale in 16-Bit Werten abgespeichert, wodurch 65536 unterschiedliche Abstufungen angenommen werden können. Je nach Verstärkungsfaktor und der Frequenz des Eingangssignales ist es nach einer vorangegangenen Kalibrierung möglich, auf den Schalldruck beliebiger akustischer Signale in einem definiertem Frequenzband zurückzurechnen. Im Folgenden sollen nun zwei Methoden vorgestellt werden, Pingersignale als solche zu erkennen.

Die Signale der Pinger dauern entweder ein oder zwei Millisekunden. Kennt man aus der Datenbank die Zeitpunkte an denen die Pinger aktiv waren, kann man anschließend in der Aufzeichnung über einen Schwellentrigger nach diesem Pinger suchen. Da die meisten Pingersignale bei normalem Betrieb von AMADEUS in die Sättigung gehen, kann die Amplitude des Hauptsignals nicht als Referenz verwendet werden. Von Interesse für die erste Methode, ist daher die kurze Einschwingphase, welche bei allen Pingern einen ähnlichen Verlauf besitzt. Empirisch stellt sich heraus, dass neben der Amplitudenhöhe, das Amplitudenverhältnis des ersten und zweiten Extremums (≈ 0.5) charakteristisch ist. Mit dieser Kenntnis wird ein Referenzpunkt P definiert, der genau auf der Zeitachse liegt und von der Kurve innerhalb der 2 Extrempunkte geschnitten wird (siehe Abbildung 4.4). Dieser, addiert zu einem konstantem, experimentell zu bestimmenden Offset², ergibt die Laufzeit des Signals.

²Anteil aus Signalverzögerungszeit der Elektronik + Definition der Pingerankunftszeit

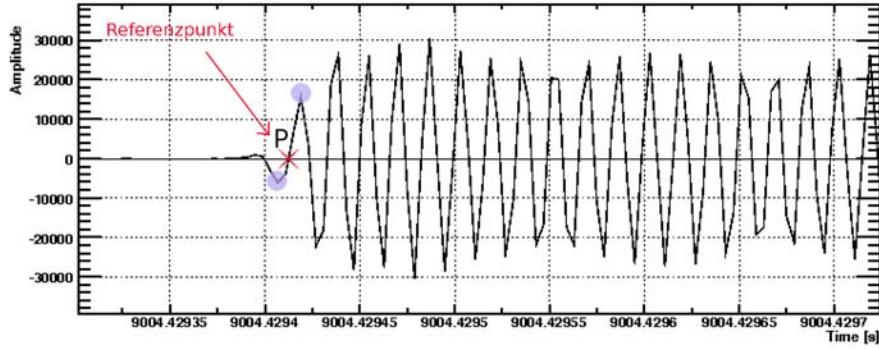


Abbildung 4.4: Einschwingphase eines Pinger-Signals

Eine andere Möglichkeit, den Pinger zu erkennen, ist die Verwendung einer Envelope-Funktion, wie sie in Abbildung 4.5 gezeigt wird. Dazu wird das Signal quadriert, anschließend wendet man einen Tiefpassfilter an, der die hochfrequenten Anteile abschneidet. Die Identifikation erfolgt anschließend über die Triggerhöhe und die Verweildauer Δt_d des Pingersignals über eben diesen. Die Höhe der Triggerschwelle wird je nach Stockwerkshöhe und Verstärkungsfaktor festgelegt und nimmt die Werte von knapp 5000 LSB bis 8000 LSB³ an. Die Verweildauer von $0.8 \text{ ms} \leq \Delta t_d \leq 2.2 \text{ ms}$ gewährleistet, dass mit einer großzügig ausgelegten Toleranz die ein und zwei Millisekunden dauernden Pingersignale erkannt werden. Um die Genauigkeit weiter zu verbessern, werden bei der Triggerung die Zeitwerte interpoliert als Endergebnis zurückgegeben.

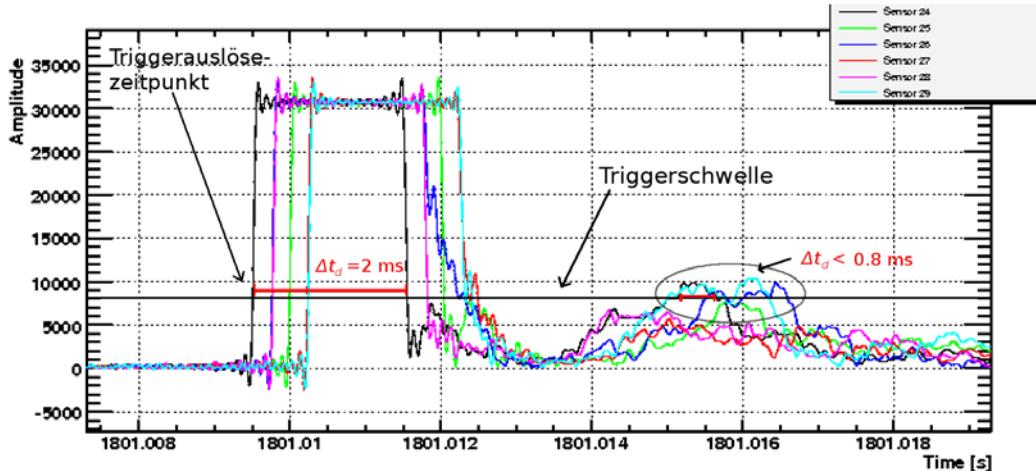


Abbildung 4.5: optimal aufgenommenes Signal mit 6 Hydrophonen. Die Sensoren 24-29 entsprechen den Hydrophonen H0 bis H5 in Abbildung 4.9

³Einheitensystem im ACD-Count Modus: least significant bits

Beide Algorithmen haben Vor- und Nachteile:

- **Nachteile**

- Einhüllende: Signale werden oft übersteuert aufgenommen oder es entstehen durch Beugung am Stockwerk Interferenzen. Die Einhüllende ist dementsprechend verformt, so dass zu spät oder gar nicht getriggert wird.
- Referenzpunktmethode: Hier besteht die Gefahr der Wahl des falschen Nulldurchgangs. Ein zu spätes Triggern um eine halbe Schwingung führt zu einem Versatz von etwa 1.7 cm (Pinger der Frequenz von 44 kHz).

- **Vorteile**

- Einhüllende: Methode ist robust und in der Regel genau, wenn die Signale nicht verzerrt vorliegen.
- Referenzpunktmethode: Diese erzielt eine höhere Präzision, sofern der richtige Nulldurchgang gewählt wurde.

Da die Referenzpunktmethode erst gegen Ende dieser Arbeit entwickelt wurde, bezieht sich die Zeitbestimmung nur noch auf die Einhüllende. Die Aussortierung der Zeitsignale, wie im nächsten Kapitel besprochen, kann ohne weiteres auch auf diese angewandt werden.

4.1.1 Selektion von Zeitsignalen

Bis zu 30 % der Pingersignale werden durchschnittlich, je nach Datensatz, verzerrt aufgenommen. Dieser Effekt ist durch Interferenzen, Abschottungen am Stockwerk und durch Übersteuerung der Elektronik zu erklären. Für eine akzeptable Anzahl von Rekonstruktionen muss der Algorithmus daher in der Lage sein, schlechte Signale auszusortieren. Gearbeitet wird mit einem Zeitfenster, wobei dessen zeitliche Breite durch die Ausdehnung des Stockwerks festgelegt wird, dies sichert einen kausalen Zusammenhang der gemessenen Signale. Die Position des Zeitfensters auf der Zeitachse wird so definiert, dass darin möglichst viele getriggerte Signale liegen müssen. Es hat folgende zwei Hauptaufgaben zu erfüllen:

- Signale werden ignoriert (z.B. andere Schallquellen), wenn sie sich außerhalb des Zeitfensters befinden.
- Aufgenommene, aber ungetriggerte Pingersignale fehlen im Zeitfenster, wodurch sie als fehlend markiert werden.

Abbildung 4.6 zeigt die 6 Einhüllenden eines Pingersignales. Die Pingerankunftszeiten konnten alle bis auf Hydrophon 27 (rot) bestimmt werden. Dieses Signal konnte nicht die Bedingung $0.8 \text{ ms} \leq \Delta t_d \leq 2 \text{ ms}$ erfüllen, wodurch es als fehlend markiert wird.

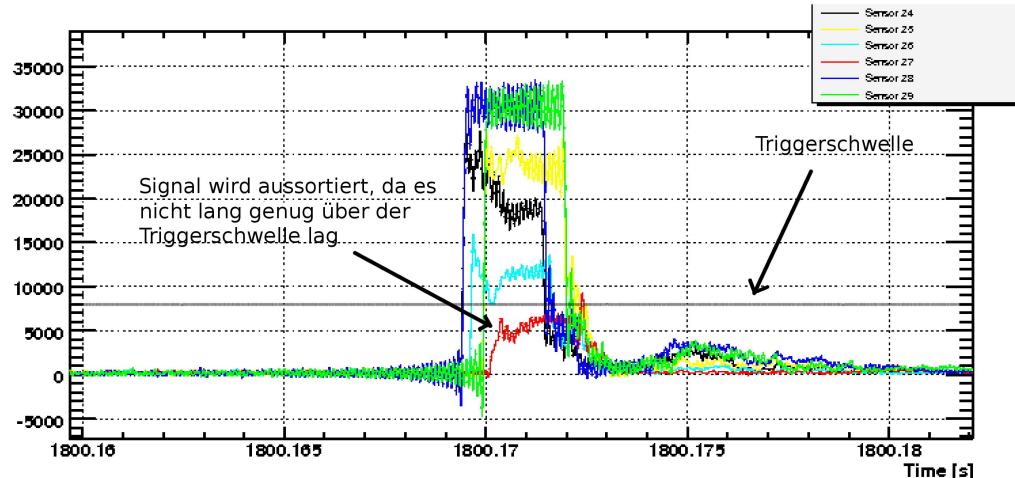


Abbildung 4.6: schlecht aufgenommenes Signal bei Hydrophon 27

Liegen dagegen verzerrte Signale innerhalb des Zeitfensters, werden sie mit dieser Methode nicht erkannt. Ein Beispiel hierfür sieht man in Abbildung 4.7. Die Hydrophone 24 (schwarz) und 25 (grün) werden zu spät getriggert, da zur Erkennung des Signals die Schwelle für mindestens einer Zeitdauer von 0.8 ms überschritten worden sein muss ($\Delta t_d < 0.8\mu\text{s}$). Bemerkbar sind diese Fehler erst im Nachhinein, wenn das Abstandsquadrat der Richtungsrekonstruktion zu schlecht wird.

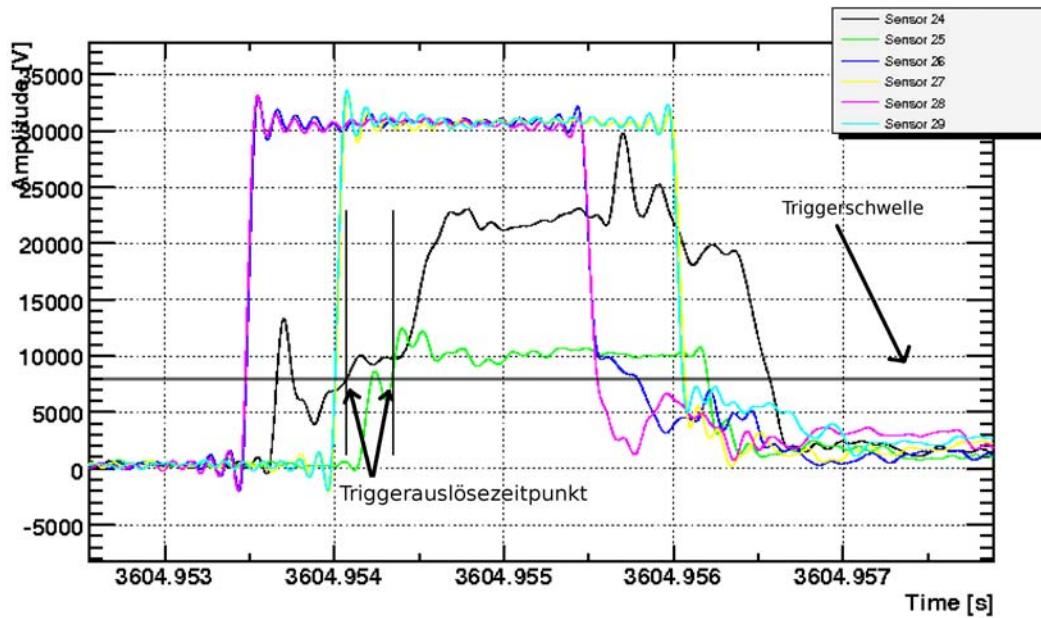


Abbildung 4.7: nicht detektierte Fehler

4.2 Berechnung der Zeitwerte t_i

In Näherung erzeugt eine punktförmige Schallquelle im Wasser eine Kugelwelle. Kugelwellen und ebene Wellen gleichen sich jedoch bei größer werdenden Entfernen und identischer Ausdehnung des Stockwerks zunehmend an, bis diese Unterschiede D vernachlässigbar klein werden.

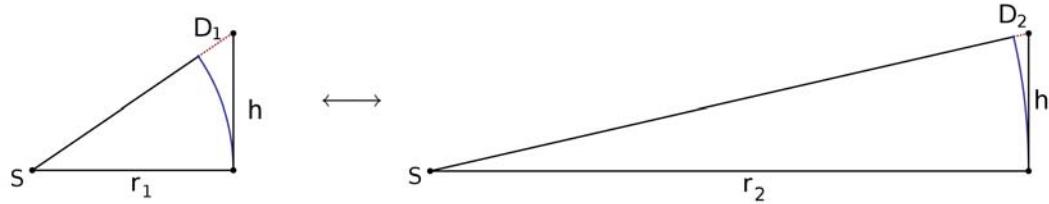


Abbildung 4.8: Die Differenz D zwischen Kugel- und Ebene-Welle schrumpft mit zunehmenden Radius

Dies soll mit Hilfe von Abbildung 4.8 veranschaulicht werden. In dem kleinen Gedankenexperiment werden zwei mögliche Wellenfronten untersucht. Eine ebene Welle, die eine waagerechte Ausbreitung in Richtung des Stockwerks besitzt (nicht eingezeichnet) und eine Kugelwelle, welche von der Quelle S aus der selben Richtung ausgesandt wird. Bei einem Radius⁴ $r = 180$ m und der Stockwerkshöhe $h = 0.8$ m, schrumpft der gemessene Unterschied D dieser beiden Wellentypen auf knapp 1.8 mm. Die Differenz D ist in jedem Fall eine Obergrenze, da diese für andere Einfallsrichtungen nie überschritten wird. Würde das Signal direkt von unten oder oben kommen, verschwindet D komplett.

Wie auf Abbildung 4.9 zu sehen, wird zur Berechnung einer Richtungsrekonstruktion eine Ebene in Abhängigkeit vom Abstand a und den Richtungswinkeln φ und ϑ rotiert. Die Distanzen d_i zwischen ihr und den einzelnen Hydrophonen werden berechnet, wodurch die Zeitabstände t_i folgen.

⁴kleinstmöglicher Abstand zu einem Pinger

$$t_i(\varphi, \vartheta, a) = \frac{d_i}{c} = \frac{|\vec{x}_i \cdot \vec{n} - a|}{c} \quad i = 0..5 \quad (4.2.1)$$

$$\vec{n}(\varphi, \vartheta) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \cdot \sin(\vartheta) \\ \sin(\varphi) \cdot \sin(\vartheta) \\ -\cos(\vartheta) \end{pmatrix}$$

\vec{x}_i : Hydrophonpositionen im Stockwerkskoordinatensystem

\vec{n} : Normalenvektor der Ebene, zeigt bei $\vec{n}(0, 0)$ zum Meeresboden

a : Abstand Ursprung-Ebene

c : Schallgeschwindigkeit auf Stockwerkshöhe

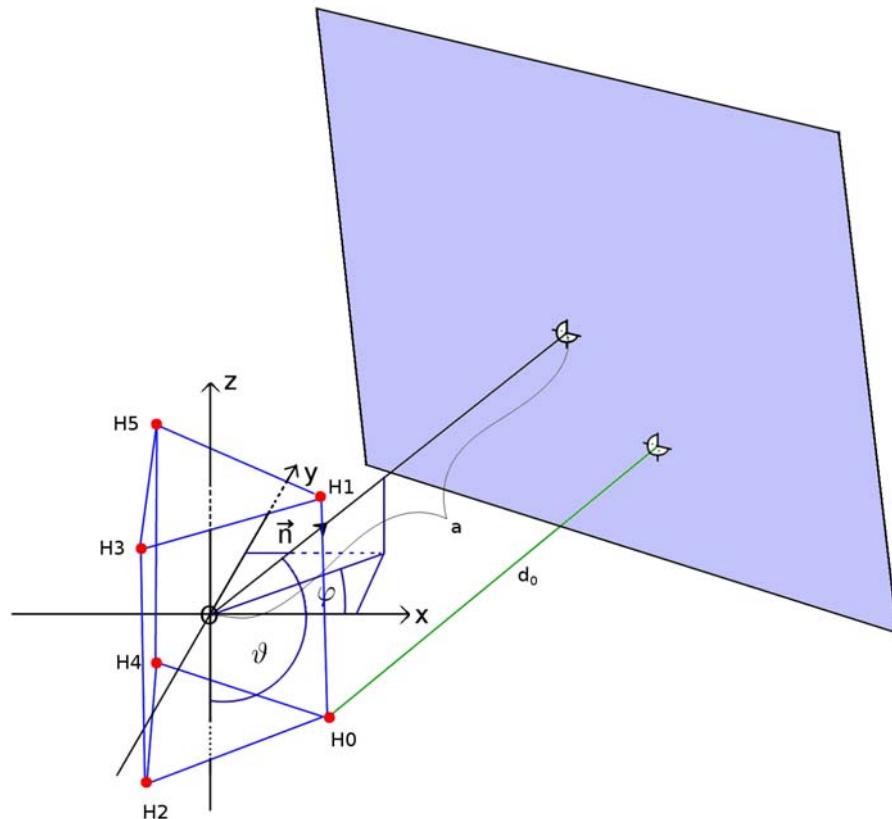


Abbildung 4.9: Distanz d_0 der ebenen Welle zum Hydrophon H_0 in Abhängigkeit vom Normalenvektor \vec{n} und dem Abstand a

4.3 Bildung des Abstandsquadrates f_1

Im besten Fall werden 6 Werte τ_i bei der Ankunft der Wellenfront gemessen. Stimmen diese genau mit den berechneten t_i überein, wäre das Problem gelöst. Es wird eine Abstandsquadat Funktion f_1 definiert, so dass die Lösung des Problems in der Minimierung der Funktion f_1 liegt.

$$f_1(\vec{\omega}) := \sum_{i=0}^5 \left(\frac{\tau_i - t_i(\vec{\omega})}{\Delta\tau_i} \right)^2 \quad (4.3.1)$$

$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} \varphi \\ \vartheta \\ a \end{pmatrix}$$

Bemerkungen:

- Wie schon erwähnt, werden häufig Schallsignale verformt aufgenommen. Als Folge davon, können deren Zeitpunkte τ_k nicht mehr bestimmt werden. Diese fehlerhaften Signale werden mit Hilfe der Zeitfenstermethode aus Kapitel 4.1.1 markiert und bleiben unberücksichtigt (d.h. $\tau_k = t_k = 0$).
- Aufgrund der gewählten Stockwerksgeometrie (siehe Abbildung 4.9) kommt es zu linearen Abhängigkeiten, wenn zwei übereinanderliegende Hydrophone z.B. H0 und H1 deaktiviert sind, so dass Spiegellösungen auftreten können. Diese Fälle werden erkannt und von der Rekonstruktion ausgeschlossen.
- Alle Messungen, sind in der Realität mit einer gewissen zeitlichen Unsicherheit verbunden. Es soll von nun an die Annahme gelten, dass die Fehler pro Hydrophon gleich groß sind ($\Delta\tau_i = \Delta\tau$), da alle Hydrophone im gleichen Stockwerk, die gleiche Bauart besitzen. Liegt eine zu erwartende Gaußverteilung der zeitlichen Unsicherheit vor, entsteht nach der Minimierung der quadratischen Abstände von τ_i und t_i die Dichte einer χ^2 -Verteilung (siehe die Kapitel: 4.4, 4.5.1 und 4.7).

Die Daten von AMADEUS werden in unterschiedlich große Dateien, den Runs abgespeichert. Die Rundauer ist wiederum von der Datenrate abhängig und beträgt im Durchschnitt mehrere Stunden. Die Länge a aus Gleichung 4.2.1, welche über die Schallgeschwindigkeit c mit t in Beziehung steht, dient zur Eliminierung des zeitlichen Offsets. Sie ist abhängig von der Rundauer und kann aus diesem Grund sehr große Werte annehmen. Die Größe a nimmt für die Minimierung folgenden Startwert an⁵:

$$a = c \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=0}^5 \tau_i \quad (4.3.2)$$

⁵exakt ist diese Gleichung, wenn alle Hydrophone aktiv wären und es keine zeitliche Unsicherheit gäbe

c = Schallgeschwindigkeit auf Stockwerkshöhe

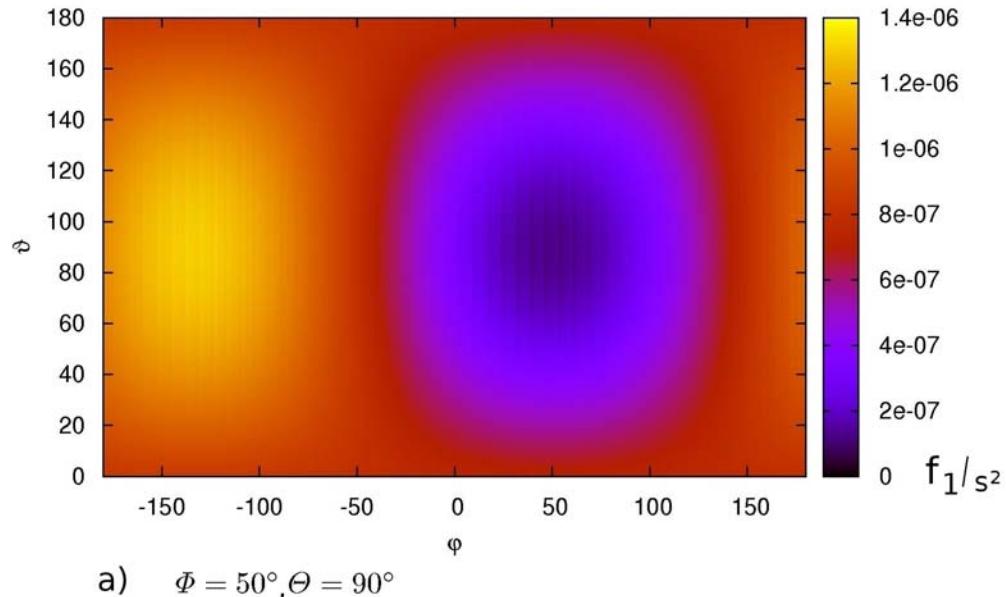
n = Anzahl der aktiven Hydrophone

$\tau_i = 0$, falls Hydrophon i inaktiv

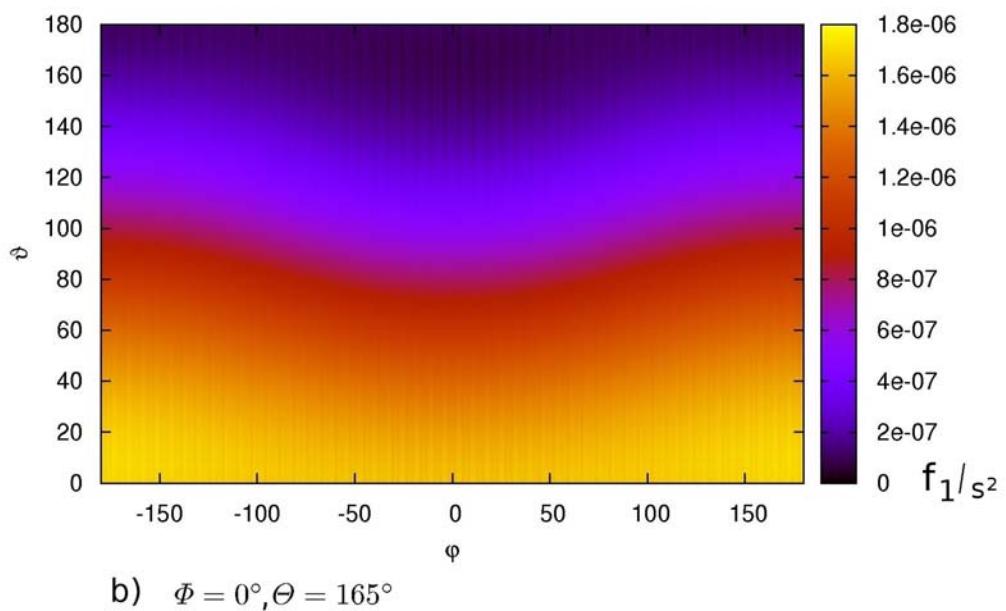
4.3.1 Minimierung der Funktion f_1

Zur Minimierung der Funktion f_1 wird MIGRAD benutzt. Um nicht in Nebenminima zu laufen, benötigt dies für die Suche nach dem globalen Minimum gute Startwerte. Den Wert für die Länge a erhält man über Gleichung 4.3.2, für φ und ϑ werden die Startwerte stochastisch ermittelt. Dabei werden k Zufallspunkte auf einer Einheitskugeloberfläche erzeugt ($0^\circ \leq \varphi < 360^\circ$, $0^\circ \leq \vartheta \leq 180^\circ$). Die Werte φ_{best} und ϑ_{best} mit dem kleinsten Abstandsquadrat, werden zusammen mit eben diesem abgespeichert. Vor dem nächsten Iterationsschritt verkleinert sich die zu untersuchende Fläche auf der Einheitskugel mit dem Zentrum $(\varphi_{\text{best}}, \vartheta_{\text{best}})$ um den Prozentsatz s , bevor von Neuem auf dieser Fläche k Zufallspunkte erzeugt werden. Man muss nun die Parameter k , s und die Anzahl der Iterationen i so wählen, dass der Algorithmus effizient arbeitet. Als Parameter wurden im Programm gewählt: $k=100$, $s=70\%$, $i=10$. Zum Schluss werden die besten Werte MIGRAD übergeben, um das globale Minimum zu finden.

4.4 Simulation einer Richtungsrekonstruktion



a) $\Phi = 50^\circ, \Theta = 90^\circ$



b) $\Phi = 0^\circ, \Theta = 165^\circ$

Abbildung 4.10: Farbkodierung der Abstandsquadratfunktion $f_1(\varphi, \vartheta)$ mit $\Delta\tau = 1$ s, bei festen Werten der Einfallsrichtung Φ und Θ

Um die Funktion f_1 mit 6 aktiven Hydrophonen auf Abbildung 4.10 zu erstellen, wurden zuerst mit der Funktion 4.2.1 die idealen Zeiten τ_i^* zu einer gegebenen Richtung Φ , Θ und dem Ebenenabstand A berechnet. Das Höhenprofil von f_1 wurde nun in Abhängigkeit von τ_i^* , φ , ϑ und a gezeichnet, wobei a den Wert von A annahm. Man erkennt bei den jeweils zwei unterschiedlichen Werten von Φ und Θ unterschiedliche Ausprägungen des Minimums. Bei Θ Werten, die nah an 0° oder 180° liegen, verschmiert das Minimum in φ Richtung (Abbildung 4.10 b). Im Vergleich dazu ist in a) das Minimum besser lokalisiert. Dieser Effekt basiert auf der Definition von Kugelkoordinaten und ist nicht auf die Stockwerksgeometrie zurückzuführen. Leicht einzusehen ist dies, wenn man sich vorstellt, dass ein Signal direkt von “oben” oder “unten” kommt, wo die Angabe der ϕ Richtung keinen Sinn macht. Interessanterweise ist die Minimierung bei konstanten Startwerten trotz der offensichtlichen Minima mit MIGRAD nicht immer möglich, da in vielen Fällen schlechte Endergebnisse für das Abstandsquadrat herauskommen⁶. Für einen schnelleren und effektiveren Algorithmus müsste daher verstanden werden, warum einige Minimierungen fehl schlagen⁷.

Für die Überprüfung des Codes wurde das Verfahren und die Parameter aus Kapitel 4.3.1 benutzt. Durch einen Zufallsgenerator wurden 30 000 zu rekonstruierende Richtungen mit den dazugehörigen idealen Zeitwerten τ_i^* erzeugt. Das Ergebnis war, dass aus diesen Richtungsrekonstruktionen 99.8 % der Resultate ein Abstandsquadrat⁸ kleiner als 10^{-15} s^2 hatten und damit als erfolgreich gelten dürfen. Jedoch müsste bei allen perfekten Zeitwerten das Abstandsquadrat genau Null sein. Das Fehlen idealer Startwerte verhindert dies. Dasselbe gilt, wenn einzelne Hydrophone gezielt deaktiviert werden. Hierbei verschärft sich die Startwertproblematik ein wenig.

In der Realität hat man immer statistische Unsicherheiten bei der Messung vorliegen. Die erwartete Verteilung aus den Differenzen der gemessenen Werte τ_i und der “wahren” Werte τ_i^* entspricht einer Gauß’schen Glockenkurve. Diese Behauptung kann für unseren Fall indirekt bewiesen werden, wenn man eine Verteilung der Abstandsquadrate (Gleichung 4.3.1) mit den dazugehörigen $\Delta\tau_i$ analysiert. Bei gaußverteilten Unsicherheiten von τ_i ergibt sich dadurch zwangsläufig die Verteilungsdichte einer χ^2 -Verteilung. Diese Behauptung wird eingehend in den Kapiteln 4.5.1 und 4.7 untersucht, wo diese Verteilungen zum einen bei simulierten, zum anderen bei realen Daten zu sehen sind. Die zeitliche Unsicherheit wird simuliert, indem um die idealen Zeitwerte τ_i^* gaußverteilte Zufallszahlen mit der Standardabweichung $\Delta\tau$ und Erwartungswert $\mu = 0$ addiert werden. Die dabei erreichte Anzahl erfolgreicher Rekonstruktionen ist mit der vergleichbar, welche keine zeitlichen Unsicherheit beinhaltet (hier getestet bis maximal $\Delta\tau = 8\mu\text{s}$).

⁶bei konstanten Startwerten sind bis zu 15 % aller Abstandsquadrate größer als 10^{-10} s^2

⁷Aus Zeitgründen wurde dies nicht weiter untersucht

⁸für die Rekonstruktionen an Realdaten erweist sich später der Wert $\min(f_1) = 10^{-15} \text{ s}^2$ als nicht mehr ganz erreichbare Grenze für die Abstandsquadrate (siehe z.B. Abbildung 4.20), weshalb das als Grenze für zuverlässige Rekonstruktionen gilt

4.5 Untersuchung realer Daten I

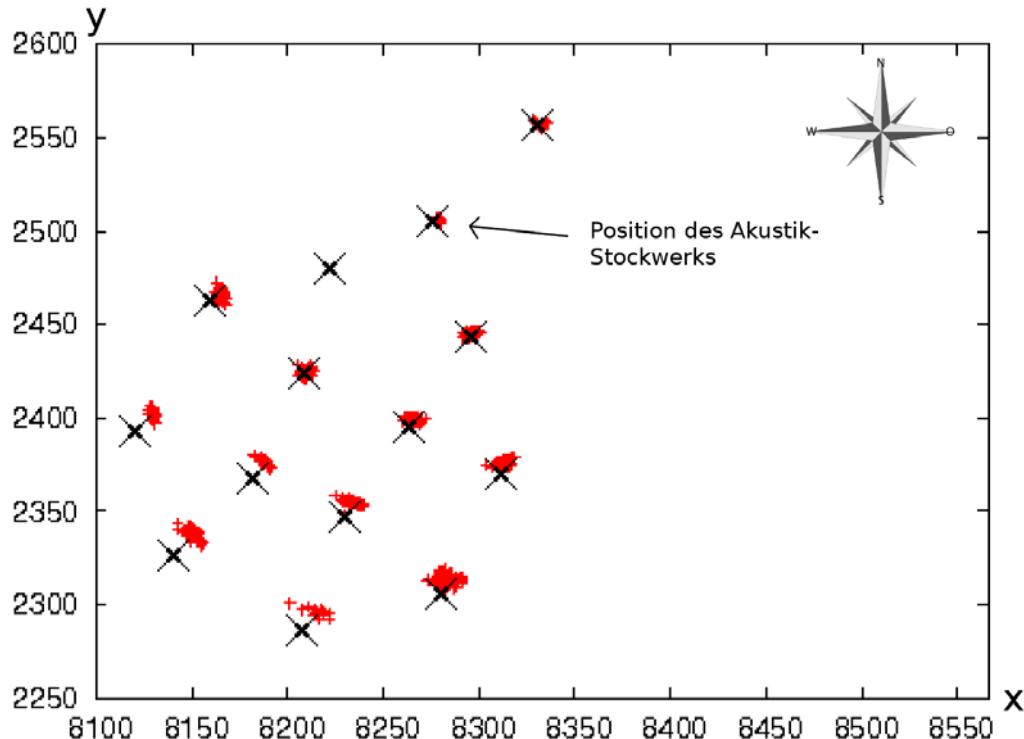


Abbildung 4.11: Unter Zuhilfenahme von Polarkoordinaten erstellter Akustik Plot der Pinger am Meeresboden

Die in einem Zeitraum von 4.5 h aufgenommene Abbildung 4.11 wurde mit Hilfe getriggter Pingersignale (siehe Kapitel 4.1) erstellt. Dieses zeigt das akustische (rot) und das durch Datenbankeinträge (schwarz) angefertigte Abbild der Pingerpositionen von ANTARES. Das akustische wurde unter der vereinfachten Annahme erstellt, dass die Stockwerke nicht verkippt sind und keine Beugungseffekte existieren. Wie in Abbildung 4.12 skizziert, wird unter Zuhilfenahme des Kompasswinkels κ die absolute Herkunftsrichtung α der Pinger rekonstruiert. Hierbei ist zu beachten, dass κ im Unterschied zu φ entgegen der mathematischen Umlaufrichtung definiert ist. Durch die ungenaue Kenntnis der Stockwerksausrichtung sind die Positionen der Pinger in der akustischen Aufnahme etwas verschmiert und weiter außen relativ zu den nominalen Werten aus der Datenbank zunehmend verschoben.

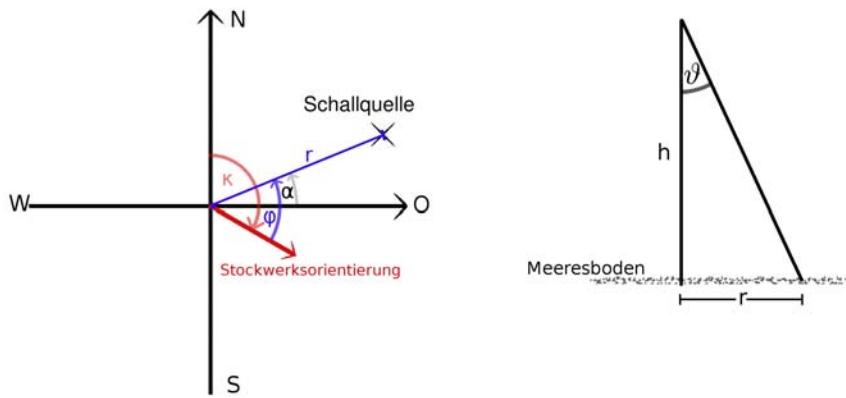


Abbildung 4.12: Konstruktionszeichnung zur Berechnung der Polarkoordinaten von α und r .

$$\alpha = 90^\circ - \kappa + \varphi \quad (4.5.1)$$

$$r = h \cdot \tan(\vartheta) \quad (4.5.2)$$

Das Phänomen der Verschiebung der Pinger in Richtung des Akustik Stockwerks lässt sich durch Abbildung 4.13 verstehen. Fordert man eine reale Verkippung der Akustik-Stockwerkskoordinaten nach Nordosten um den Winkel δ und rekonstruiert mit der eben genannten Methode die Pingerpositionen, erscheint jede reale Länge a unter der verkürzten Länge b . Die Längenverkürzung ist damit ein reiner Projektionseffekt. Dies wurde für diesen Run noch einmal mit Hilfe der Stockwerkspositionierung ab Kapitel 3.2 bestätigt.

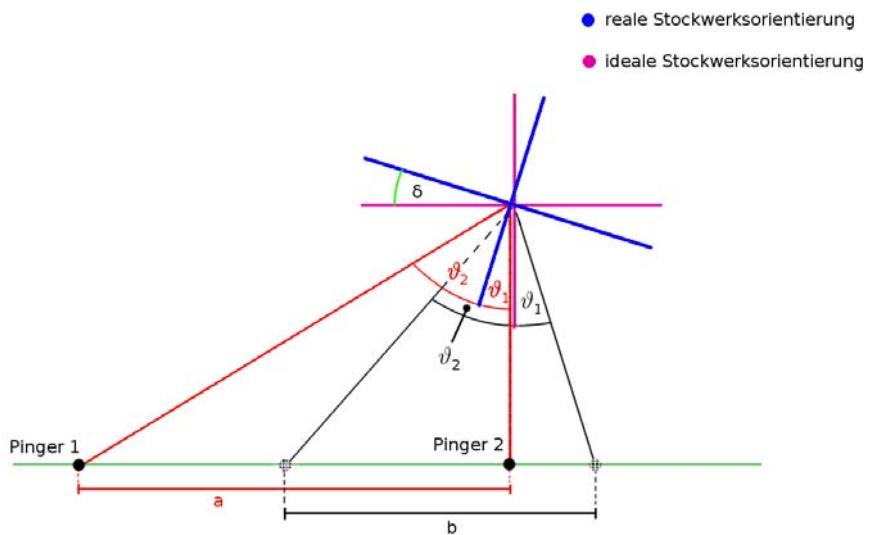


Abbildung 4.13: Die Stockwerkskoordinaten sind um den Winkel δ verkippt, wodurch a unter der verkürzten Länge b erscheint

4.5.1 Verteilung der Realdaten

Um die Winkelauflösung zu bestimmen, muss man die Abstandquadrat-Verteilung der Realdaten ermitteln. Die beiden folgenden Bilder zeigen die nach der Simulation zu erwartende⁹ und die von Realdaten produzierte Verteilung. Letztere ist stark abhängig von der korrekt angegebenen Schallgeschwindigkeit, welche für das Stockwerk 2 den Wert $c = 1543 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ hat.

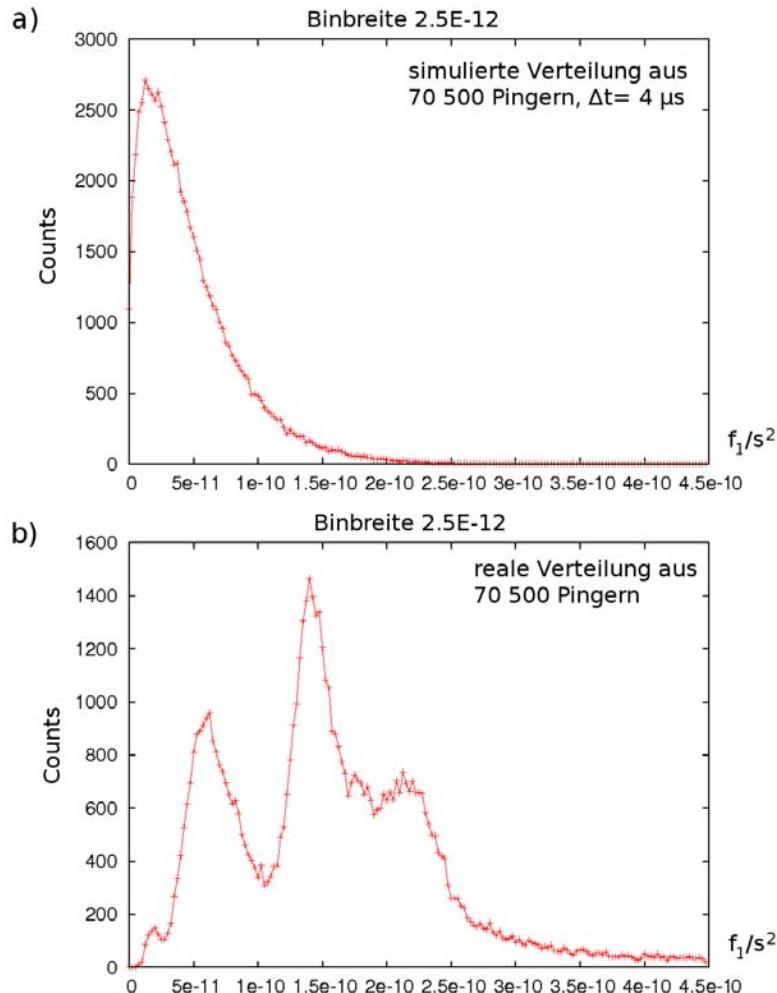


Abbildung 4.14: Vergleich zwischen simulierten und Realdaten, a) und b), bei jeweils 6 aktiven Hydrophonen

Der Verlauf des simulierten Graphen wurde unter zwei Annahmen erstellt:

- Alle Hydrophone arbeiten unabhängig voneinander.
- Die Unsicherheit der Zeitmessung folgt einer Gaußverteilung.

⁹Zeitauflösung wurde mit der Inversen zur Samplingfrequenz $\Delta t = 4\mu\text{s} = \frac{1}{250\text{kHz}}$ angenommen

Erstere Voraussetzung hängt mit der Konstruktion, die letztere mit einer statistischen Grundannahme zusammen. Die abweichende Verteilung der Realdaten hat eine andere plausible Ursache, die der zu ungenau bestimmten Hydrophonpositionen.

4.6 Positionsbestimmung der Hydrophone

Für systematische Fehler kommen z.B. regelmäßig falsch getriggerte Pingersignale oder ungenau vermessene Hydrophonpositionen in Frage. Ersteres wurde ausgeschlossen, indem mit Hilfe von Rohdaten (siehe Abbildung 4.4) die Pingerzeitpunkte ausgelesen wurden. Diese Werte lieferten ähnliche Ergebnisse beim Abstandsquadrat, wie die Methode der Einhüllenden.

Verschiebt man eine der Hydrophonpositionen und startet damit erneut die Rekonstruktionen an realen Daten, erhält man ein abweichendes Ergebnis zu den nominal angegebenen Hydrophonpositionen (siehe Abbildung 4.15).

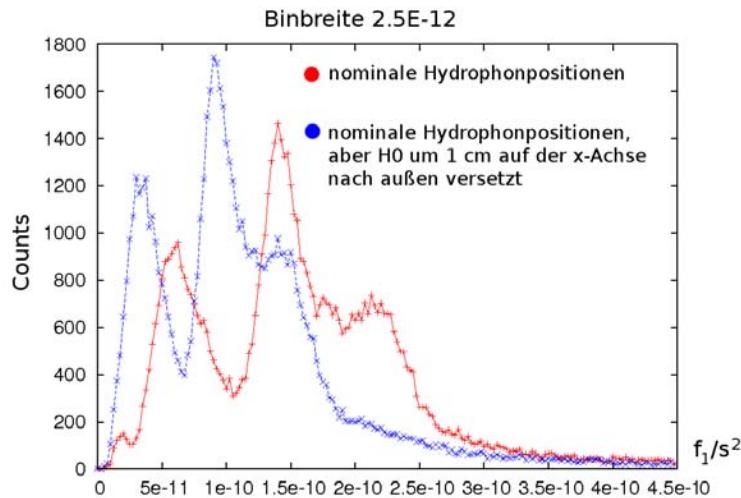


Abbildung 4.15: Verteilung der realen Daten nach Versetzen von Hydrophon H0, bei 6 aktiven Hydrophonen

Wird versucht die Zackenbildung durch eine Simulation nachzubilden, zeigt sich, dass eine Ursache neben den falschen Hydrophonpositionen die geringe Verkippung des Stockwerks ist. Die Pingersignale kommen aus 14 unterscheidbaren dicht beieinander liegenden ϑ -Bereichen (siehe Abbildung 4.1).

Die Vermessung der Hydrophonpositionen erfolgte an Land, indem man ihre relativen Abstände zueinander bestimmte. Die daraus berechneten dreidimensionalen Positionen wurden in eine Datenbank eingetragen. Das Grundproblem dabei ist, dass die Positionen der Piezokristalle ($\varnothing \approx 2.5$ cm) in den undurchsichtigen HTI-Hydrophonen ($\varnothing = 3.7$ cm) nicht genau bestimmt werden konnten (siehe Abbildung 4.16).

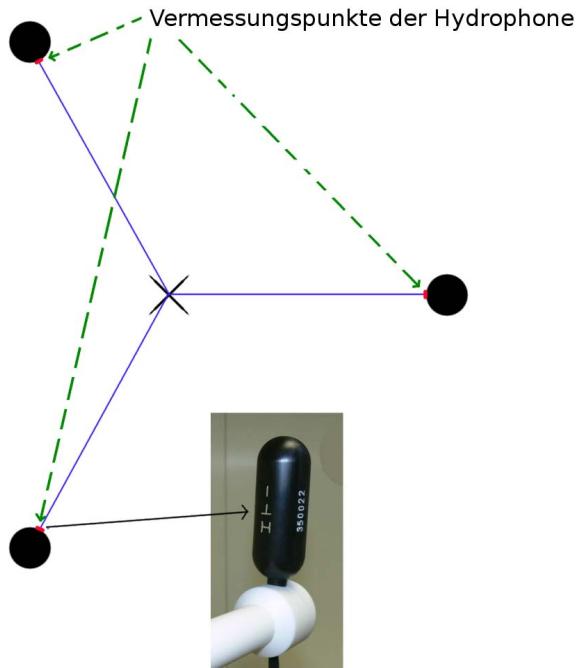


Abbildung 4.16: Sicht von oben auf das Akustik Stockwerk: Definition der Vermessungspunkte zur Bestimmung der Hydrophonpositionen (Vermessungspunkt ist das umgedrehte T in HTI)

Ziel ist es, die Positionen der Piezokristalle in den Hydrophonen zu finden. Diese sollen im Nachhinein mit Hilfe von Pingersignalen im Meer bestimmt werden. Dass dies möglich sein sollte, basiert auf einer Fehlerabschätzung:

Angenommen, die zeitliche Auflösung läge grob bei $\Delta t_{guess} = 4 \mu s = \frac{1}{250 \text{ kHz}}$, der Inversen zur Samplingfrequenz. Der Fehler berechnet sich für diesen Fall:

$$6 \text{ mm} \approx \Delta l = \Delta t_{guess} \cdot c = 4 \mu s \cdot 1543 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die Größenordnung läge damit im Millimeter-Bereich, und verbessert sich mit der Anzahl der verwendeten Pinger.

Um die Orte der Piezokristalle zu bestimmen, gilt folgende Grundüberlegung:
 Sollten die Positionen falsch angegeben worden sein, so werden alle n Richtungsrekonstruktionen schlechter und damit jedes einzelne Abstandsquadrat $\min(f_{1j})$. Formuliert man dies um, so ist die Summe F über alle Abstandsquadrate $\min(f_{1j})$ dann minimal, wenn die exakten Positionen gefunden wurden:

$$F := \sum_{j=1}^n \min(f_{1j}) \quad n = \text{Anzahl der Pingesignale} \quad (4.6.1)$$

Für das Resultat ist es wichtig, eine intelligente Vorsortierung vorzuschalten. Schlecht getriggerte Signale (siehe Abbildung 4.7) müssen anhand ihres Abstandsquadrates $\min(f_1)$ aussortiert werden. Einem schlechtem Abstandsquadrat muss aber nicht unbedingt ein schlecht getriggertes Signal zugrunde liegen, Grund kann auch die Ungenauigkeit einer Hydrophonposition sein. Setzt man das Abstandsquadrat zu niedrig, d.h. zu gut an, werden die meisten Werte aussortiert und man optimiert auf die ohnehin schon guten Werte. Zu Beginn ist es unklar, bei welcher Schwelle die Signale anhand ihres Abstandsquadrates aussortiert werden müssen. Die Grenzen werden deshalb schrittweise angehoben und anschließend eine vollständige Neupositionierung der Hydrophone gestartet. Diese liefert für die nächste Berechnung die neuen Anfangspositionen der Hydrophone. Das geschieht einige Male, bis sich die Positionen nur noch wenig ändern. Dieser Zwang zur Aussortierung könnte mit der Referenzpunktmethode umgangen werden, da er sich als Folge der Einhüllenden ergibt.

Wie in Kapitel 4.2 ersichtlich, ist die Funktion F von den Variablen $\varphi_j, \vartheta_j, a_j$ ($j \in 1..n$) und den Hydrophonpositionen \vec{x}_i ($i \in 0..5$) abhängig. In der Praxis verlaufen zwei voneinander getrennte Minimierungen. Zum einen die Richtungsrekonstruktionen, zum anderen die Positionierung der 6 Hydrophone mit ihren 18 Parametern. Die Suchstrategie für die 18 Zufallszahlen beruht auf einem Monte-Carlo-Verfahren.

- **Schritt A)**

Die Rekonstruktionen werden mit den nominalen, gemessenen Hydrophonpositionen gestartet. Für einen späteren Vergleich mit den neuen Positionen, wird zum Schluss die Summe F_{start} über alle Abstandsquadrate gebildet.

- **Schritt B)**

Um jedes einzelne Hydrophon der Position \vec{x}_i werden 3 Zufallszahlen (x, y, z) in einem Würfel der Größe¹⁰ R^3 erzeugt, welche die neue Hydrophonposition darstellen. Die Richtungsrekonstruktionen werden von neuem gestartet und die Summe F gebildet. Dieser Schritt wiederholt sich N -mal. Aus allen N Versuchen wird das kleinste Abstandsquadrat F_{min} , mit den dazugehörigen 18 neuen Hydrophon-Koordinaten abgespeichert. Wird kein Abstandsquadrat F_{min} gefunden, welches kleiner als das vorherige war, bleibt es bei den alten Hydrophonpositionen.

- **Schritt C)**

Die besten Koordinaten aus Schritt B sind zusammen mit F_{min} die neuen Ausgangspunkte. Die Würfel der Kantenlänge R verkleinern sich um einen bestimmten Prozentsatz S , so dass Schritt B von Neuem mit den aktualisierten Parametern ausgeführt werden kann.

Die Schritte B) und C) sind Iterationsschritte und wiederholen sich K , bzw. $K - 1$ mal. Für N, S und K müssen die bestmöglichen Parameter bestimmt werden. Im Programm haben diese die Werte: $N = 70$, $S = 10\%$, $K = 40$.

¹⁰Startwert im Programm $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$

Bei jeder Iteration kann das Stockwerk eine Translationsbewegung vollziehen oder sich verdrehen. Um diesen Effekt zu verhindern und untereinander vergleichbare Ergebnisse zu schaffen, werden folgende Konventionen eingeführt, die die Position des Stockwerks eindeutig festlegen:

- Der Schwerpunkt aller Hydrophone liegt im Ursprung.
- Der Schwerpunkt aller unteren Hydrophone liegt exakt auf der z-Achse.
- Hydrophon 0 befindet sich genau in der x - z -Ebene, d.h $y=0$.

$$\vec{S} := \frac{1}{6} \sum_{i=0}^5 \vec{x}_i = \vec{0} \quad (4.6.2)$$

$$\vec{s}_u := \frac{1}{3} \cdot (\vec{x}_0 + \vec{x}_2 + \vec{x}_4) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -h \end{pmatrix} \quad (4.6.3)$$

$$\vec{x}_0 := \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (4.6.4)$$

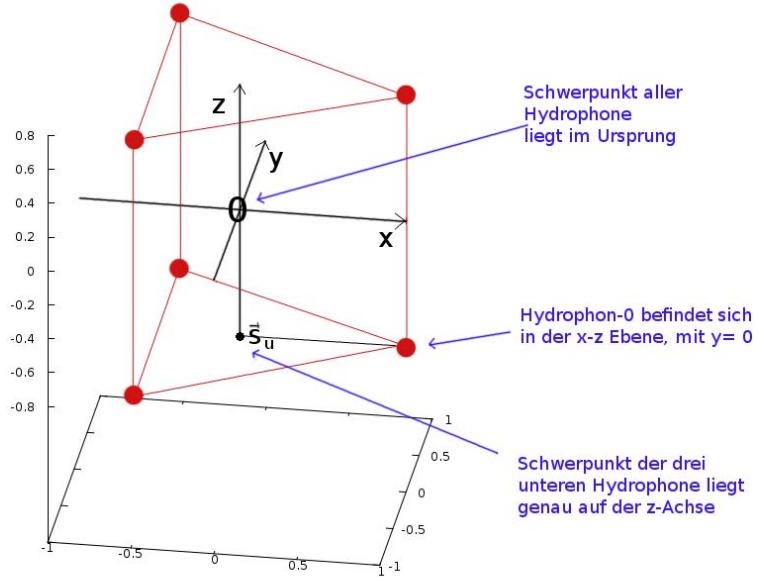


Abbildung 4.17: Position des Stockwerks nach der Transformation

Kommt es zu Bewegungen der Translation oder der Rotation, werden diese rückgängig gemacht.

Gewonnene Daten nach der Neupositionierung:

Tabelle 4.1: Aus gleichen Datensätzen berechnete Piezokristall-Positionen, in Meter.
(Schallgeschwindigkeit auf Stockwerk 2: $c = 1543 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

Hydrophon	x	y	z
H0	0.532	0.000	-0.422
H1	0.508	0.008	0.440
H2	-0.272	-0.468	-0.433
H3	-0.253	-0.453	0.426
H4	-0.261	0.468	-0.433
H5	-0.255	0.445	0.423

Hydrophon	x	y	z
H0	0.533	0.000	-0.422
H1	0.508	0.008	0.440
H2	-0.274	-0.469	-0.435
H3	-0.255	-0.455	0.424
H4	-0.259	0.469	-0.432
H5	-0.253	0.447	0.425

Tabelle 4.2: Nominalwerte der Hydrophonpositionen in Meter

Hydrophon	x	y	z
H0	0.511	0.000	-0.427
H1	0.483	0.010	0.427
H2	-0.254	-0.441	-0.426
H3	-0.236	-0.423	0.425
H4	-0.257	0.441	-0.423
H5	-0.247	0.413	0.424

Tabelle 4.3: Mittelwerte aus Tabelle 4.1 in Meter

Hydrophon	x	y	z
H0	0.533	0.000	-0.422
H1	0.508	0.008	0.439
H2	-0.271	-0.467	-0.432
H3	-0.253	-0.453	0.426
H4	-0.261	0.467	-0.434
H5	-0.255	0.445	0.423

Startet man den Algorithmus mehrmals mit dem gleichen Datensatz (ca. 6000 Pinger), entstehen am Ende vier vergleichbare Ergebnisse (siehe Tabelle 4.1) mit einer Abweichung im Millimeterbereich. Dies zeigt, dass der Algorithmus stabil auf dieselben Positionen zusteuert. Die kleinen Unterschiede sind zum Teil wohl im Monte-Carlo-Verfahren zu suchen. Eine genaue Ursachenforschung wurde aber nicht weiter betrieben. Verwendet man auf der anderen Seite eine geringere Anzahl an Pingern¹¹, werden die Abweichungen untereinander zunehmend größer, dennoch sind auch diese Ergebnisse mit denen aus Tabelle 4.1 vergleichbar.

¹¹getestet wurde dies mit ca. 2000 und 500 Signalen

Vergleicht man nun die Abweichung der neuen Hydrophonpositionen zu den nominal angegebenen, sind diese nach der Berechnung alle im erlaubten Rahmen (Hydrophondurchmesser $\varnothing=3,7\text{cm}$) nach “außen” gewandert. Dies liegt in Übereinstimmung mit den Vermessungspunkten (vgl. Abbildung 4.16) der Hydrophone, wobei deren Genauigkeit mit etwa $\pm 1\text{ cm}$ angegeben wurde.

4.7 Untersuchung realer Daten II

Abbildung 4.18 zeigt die neue Verteilung der Abstandsquadrate. Vergleicht man diese mit der Verteilung aus Abbildung 4.14 b), ist sie sowohl in der Größenordnung der Abstandsquadratwerte, als auch im Kurvenverlauf eine deutliche Verbesserung.

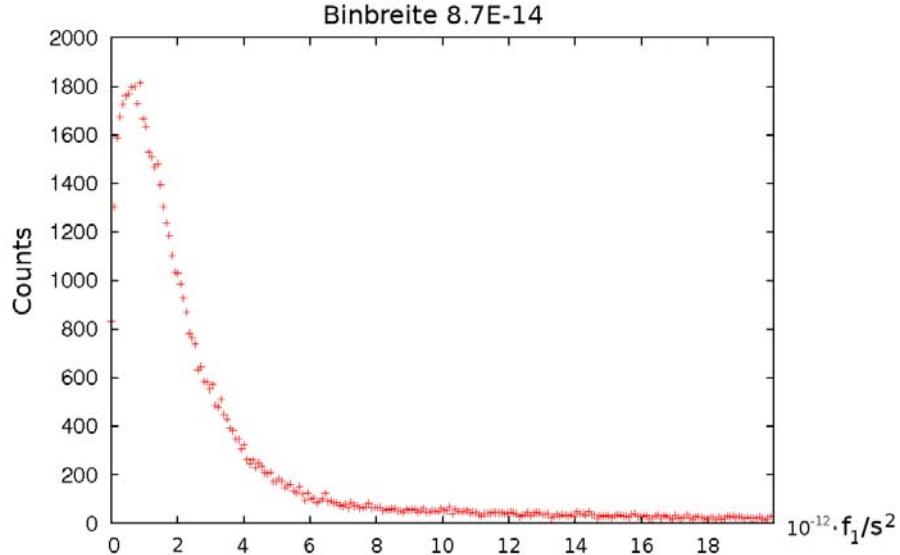


Abbildung 4.18: mit 6 aktiven Hydrophonen gewonnene neue Verteilung, der Abstandsquadrate $\min(f_1)$, ($\Delta\tau = 1$ s)

Ziel ist es über die zu bestimmende Zeitauflösung $\Delta\tau$, die Winkelauflösung der Stockwerke zu berechnen. Bei einer großen Anzahl von Richtungsrekonstruktionen, entsteht bei geeigneter Wahl von $\Delta\tau$ und nach Normierung, die Dichte einer Chi-quadratverteilung. Die Grundannahme dieser Verteilungsdichte basiert auf standardnormalverteilten Zufallszahlen welche quadriert und summiert werden. Die Anzahl der Freiheitsgrade bestimmen dabei den Verlauf der Kurve. Freiheitsgrade bedeuten im Sinne der Statistik, wieviele voneinander unabhängige Zufallszahlen in die Berechnung mit eingehen. Für den Fall der Richtungsrekonstruktion im Akustik Stockwerk gilt:

Anzahl der Freiheitsgrade = aktive Hydrophone - Anzahl der berücksichtigten Parameter

Definition der Dichte d_m einer Chi-quadratverteilung mit m Freiheitsgraden:

$$d_m(x) := \begin{cases} \frac{x^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}}}{2^{\frac{m}{2}} \Gamma(\frac{m}{2})} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

Für ein Stockwerk mit 6 aktiven Hydrophonen und 3 zu berücksichtigenden Parametern, φ, ϑ und a , existieren 3 Freiheitsgrade. Für die Dichte d_3 der Chi-quadratverteilung

ergibt sich somit:

$$d_3(x) := \begin{cases} \frac{\sqrt{x}e^{-\frac{x}{2}}}{\sqrt{2\pi}} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.7.1)$$

Versucht man nun die neue Verteilung der Realdaten an die Dichte d_3 anzupassen, erhält man für die zeitliche Unsicherheit $\Delta\tau = 0.8 \mu\text{s}$.

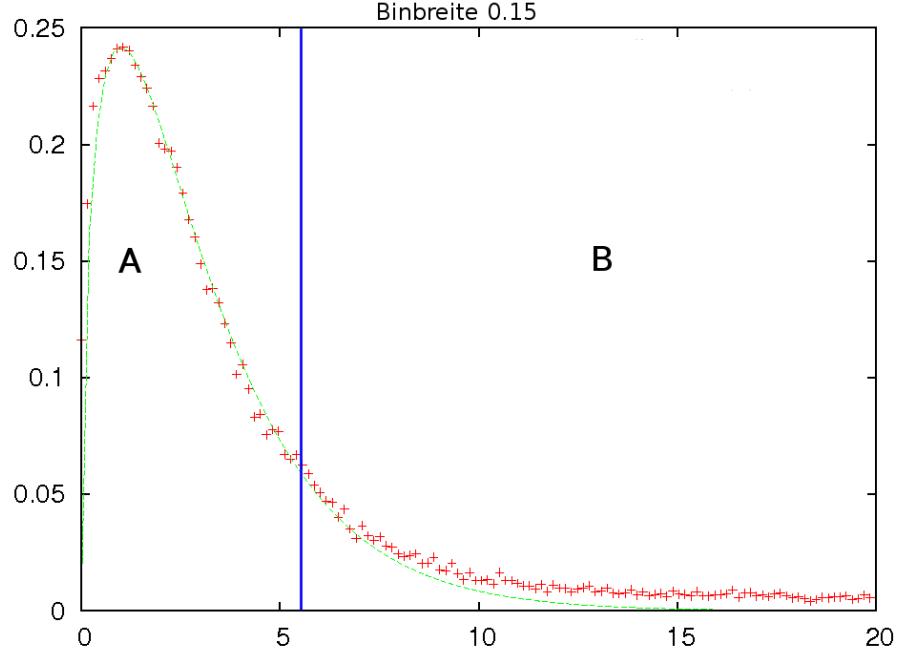


Abbildung 4.19: Versuch einer Anpassung realer Daten an die Verteilungsdichte d_3 mit $\Delta\tau = 0.8 \mu\text{s}$

Abbildung 4.19 ist in die zwei Bereiche A und B aufgeteilt. In A war die Anpassung augenscheinlich erfolgreicher als im Teil B, wo die Rekonstruktionen systematisch zu schlecht sind. Den Grund zeigt Abbildung 4.20, wo die Vorsortierung und Optimierung speziell für eine Vorzugsrichtung verliefen. Zwischen -25° und $+5^\circ$ sind die Abstandsquadrate besonders niedrig (gut). Entfernt man sich von diesem Bereich, werden diese schlechter. Interessant ist auch das Verhalten des Pyramidenpingers, da man hier die Güte der Richtungsrekonstruktion besonders gut in Abhängigkeit vom Winkel φ erkennt. Hier existieren sogar Bereiche, wo die berechneten Hydrophonpositionen für den Winkelausschnitt schlechter als die nominalen Hydrophonpositionen sind.

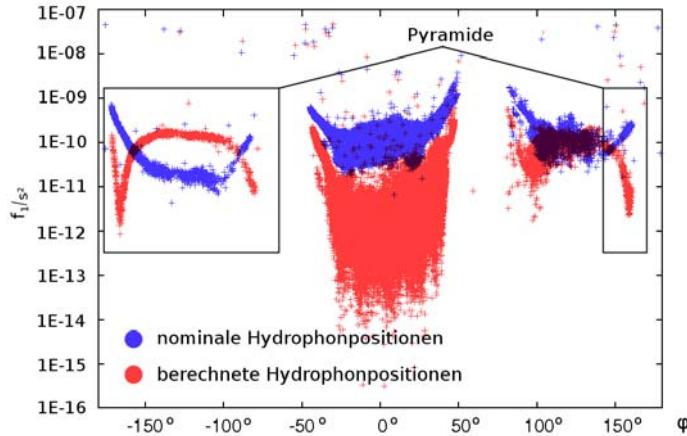


Abbildung 4.20: φ vs. Abstandsquadrat $\min(f_1)$ bei 6 aktiven Hydrophonen, $\Delta\tau = 1$ s

Ein zweites Resultat liefern die Abbildungen 4.20 und 4.21, wenn man der Frage nachgeht, warum zwischen zwischen $+50^\circ$ und knapp $+80^\circ$ eine Lücke an Rekonstruktionen existiert¹². Lässt man zusätzlich die Richtungsrekonstruktionen zu, an denen entweder 4 oder 5 aktivierte Hydrophone beteiligt sind, wird diese geschlossen (Abbildung 4.21). Das deckt sich mit der Theorie der Abschottungseffekte, wenn Signale aus einer bestimmten Richtung kommen.

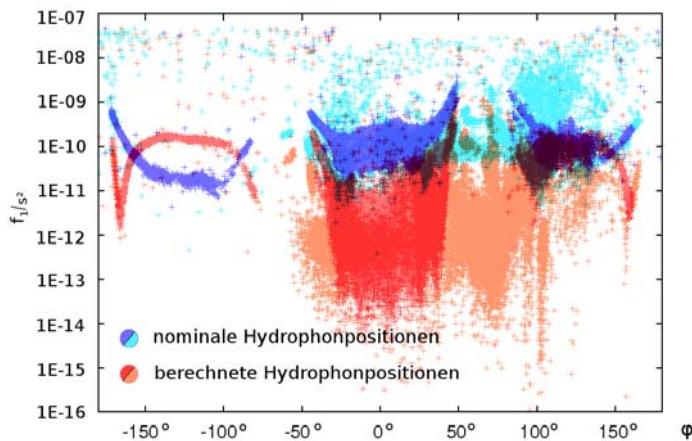


Abbildung 4.21: Abschottungs- und Interferenzeffekte am Stockwerk verhindern wahrscheinlich Pingerrekonstruktionen mit 6 Hydrophonen bei bestimmten Richtungen. Dunklere Farben (blau und rot) repräsentieren Rekonstruktionen mit 6, hellere mit 4 und 5 Hydrophonen, $\Delta\tau = 1$ s

Gesichert ist auch die Herkunft der Pinger, wenn man für diesen großen Datensatz die Rekonstruktionen startet und eine Grafik wie auf Abbildung 4.11 erstellt. Man kann sich dann davon überzeugen, dass einerseits die Masse der Pinger zu ANTARES gehört, aber auch die Pyramide in Abbildung 4.20 richtig zugeordnet wurde.

¹²Diese Lücke existiert wahrscheinlich auch bei -50° und -80° , hier liegen aber keine Daten vor

Warum die Rekonstruktion schlechter bei bestimmten Richtungen werden, ist ungeklärt. Wahrscheinlich sind die Hydrophonpositionen für diese Richtungen weniger gut optimiert, da wohl zur Positionsbestimmung der Hydrophone (siehe Kapitel 4.6) Pingersignale aus einer Hauptrichtung benutzt wurden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass aus möglichst vielen verschiedenen Raumrichtungen Signale zur Rekonstruktion gesammelt werden müssten.

Beschränkt man sich bei der Winkel Rekonstruktion in diesem speziellen Fall auf den φ -Winkelbereich zwischen -25° und $+5^\circ$, kann die neue Verteilung besser mit der Dichte einer χ^2 -Verteilung (d_3) beschrieben werden. Gefordert wurde nun, dass der Schwerpunkt bei 3 liegt und die Fläche unter dem Graphen genau 1 haben muss, woraus unmittelbar $\Delta\tau = 0.8 \mu\text{s}$ folgt¹³.

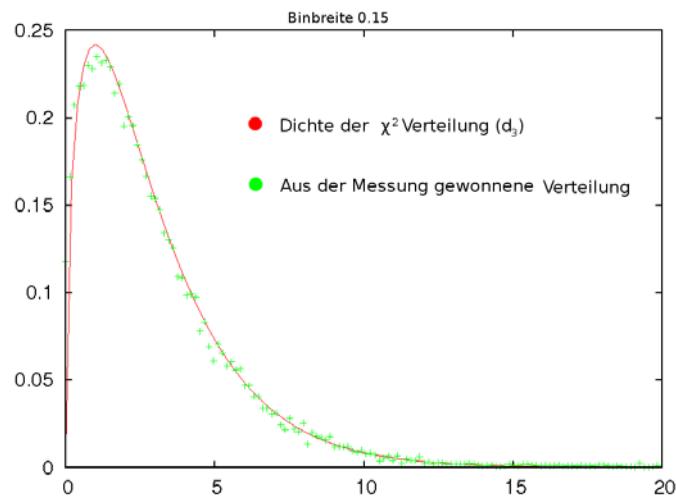


Abbildung 4.22: Neue Verteilung im Winkelbereich von -25° bis $+5^\circ$, $\Delta\tau = 0.8 \mu\text{s}$

¹³Diese Bedingungen folgen aus der Verteilungsdichte d_3

4.7.1 Winkelauflösung der Akustikstockwerke

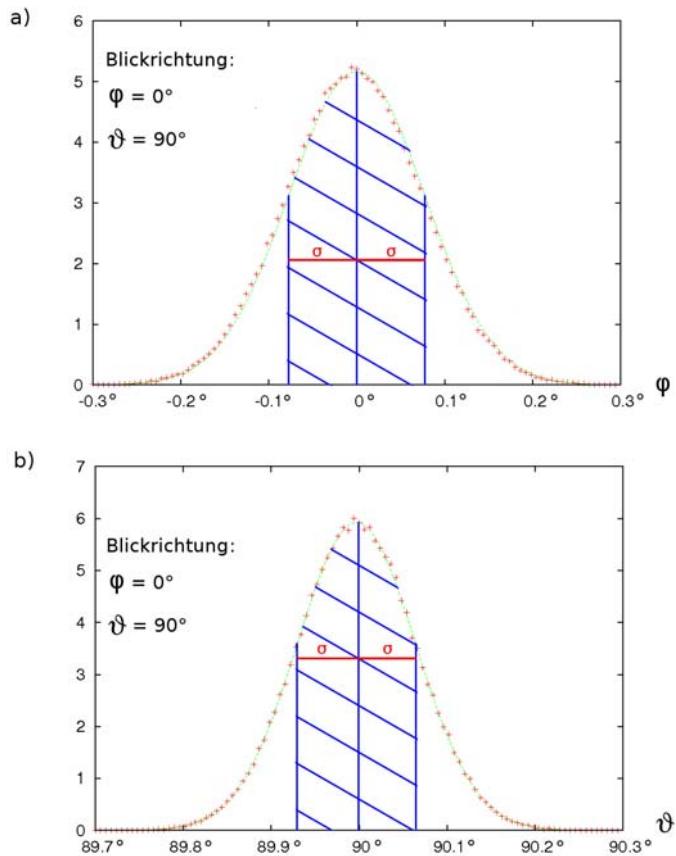


Abbildung 4.23: Simulation von 200 000 Richtungsrekonstruktionen mit einer zeitlichen Unsicherheit von $\Delta\tau = 0.8 \mu\text{s}$. Die Winkelauflösung ergibt sich aus der Verteilung der Rekonstruktionen in Abhängigkeit von der Blickrichtung
(hier: $\Delta\varphi = 0.074^\circ$, $\Delta\vartheta = 0.068^\circ$)

In Abbildung 4.23 a) und b) sind zwei Verteilungen zu sehen, die nach 200 000 simulierten Rekonstruktionen für $\varphi = 0^\circ$ und $\vartheta = 90^\circ$ bei einer Zeitauflösung von $\Delta\tau = 0.8 \mu\text{s}$ entstanden sind. Für unterschiedliche Blickrichtungen sind verschiedene Standardabweichungen zu erwarten. Deren Berechnung soll nun in Abhängigkeit von der Blickrichtung mit Hilfe einer anderen Methode erfolgen. Wie schon diskutiert, ist es mit Hilfe des globalen Minimums der Funktion $f_1(\vec{\omega})$ möglich die Lösung $\vec{\omega}_L$ einer Richtungsrekonstruktion zu bestimmen. Zur Berechnung der Winkelauflösung soll gelten, dass die Zeitwerte τ_i ohne zeitliche Unsicherheit vorliegen. Mit Hilfe von Gleichung 4.2.1 werden sie berechnet und werden τ_i^* genannt.

$$\begin{aligned}\min(f_1(\vec{\omega}, \vec{\tau}^*)) &= f_1(\vec{\omega}_L, \vec{\tau}^*) \\ \min(f_1(\vec{\omega}, \vec{\tau}^*)) &\rightarrow \vec{\omega}_L\end{aligned}$$

Die Funktion $\min(f_1(\vec{\omega}, \vec{\tau}^*))$ ist effektiv nur vom Zeitvektor $\vec{\tau}^*$ abhängig, da durch das Minimum $\vec{\omega} = \vec{\omega}_L$ festgelegt wird. Daher soll die neue Funktion \vec{f}_2 folgende Bedingung erfüllen:

$$\vec{f}_2(\vec{\tau}^*) = \vec{\omega}_L \leftarrow \min(f_1(\vec{\omega}, \vec{\tau}^*)) \quad (4.7.2)$$

Die Kovarianzen zwischen den (gemessenen) Zeitwerten τ_i, τ_j sind bei jeweils zwei verschiedenen Hydrophonen Null ($\text{cov}_{ij} = 0, \forall i \neq j$), da diese sich nicht gegenseitig beeinflussen. Die Fehlerrechnung beschränkt sich daher auf die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung.

$$\Delta\varphi = \sqrt{\sum_{i=0}^5 \left(\frac{df_{2\varphi}}{d\tau_i^*} \cdot \Delta\tau_i \right)^2} \quad (4.7.3)$$

$$\Delta\vartheta = \sqrt{\sum_{i=0}^5 \left(\frac{df_{2\vartheta}}{d\tau_i^*} \cdot \Delta\tau_i \right)^2} \quad (4.7.4)$$

Die Ableitungen werden numerisch bestimmt, was in Gleichung 4.7.5 für τ_0^* demonstriert wird:

$$f_{2\varphi} + \frac{df_{2\varphi}}{d\tau_0^*} \cdot d\tau_0^* = f_{2\varphi}(\tau_0^* + d\tau_0^*, \dots, \tau_5^*) \quad (4.7.5)$$

Des weiteren muss darauf geachtet werden, dass die Werte $d\tau_0^* \dots d\tau_5^*$ nicht zu klein gewählt¹⁴ werden, da sonst numerische Effekte das Ergebnis verfälschen, können. In der Numerik wird dieses Problem als Auslöschung bezeichnet.

Berechnet man die Winkelauflösung in φ und ϑ Richtung, stellt man für die Funktionen 4.7.3 und 4.7.4 fest, dass diese hauptsächlich von ϑ abhängen (Abbildung 4.24). Bei konstantem ϑ liegen in φ Richtung liegen die Schwankungen der Auflösung $\Delta\varphi$ und $\Delta\vartheta$ im Promille Bereich.

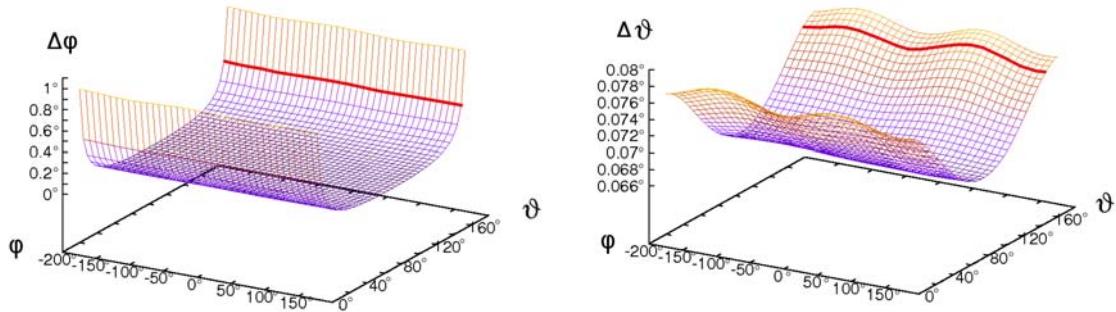


Abbildung 4.24: Winkelunsicherheiten $\Delta\varphi$ und $\Delta\vartheta$ in Abhängigkeit von φ und ϑ .

¹⁴Diese besitzen den Wert: $d\tau_i^* = 1 \cdot 10^{-10} \text{ s}$

Der Leserlichkeit wegen, werden die Graphen so gewählt, dass nur die maximalen Fehler $\Delta\varphi_{\max}$ und $\Delta\vartheta_{\max}$ in Abhängigkeit von ϑ sichtbar werden. Hier wird für jeweils einen konstanten ϑ Wert das Maximum der Funktion in Abhängigkeit von φ gesucht. Das prinzipielle Vorgehen ist nocheinmal auf Abbildung 4.24 angedeutet, wo auf den jeweiligen rot eingezeichneten Kurven die Maxima gesucht werden.

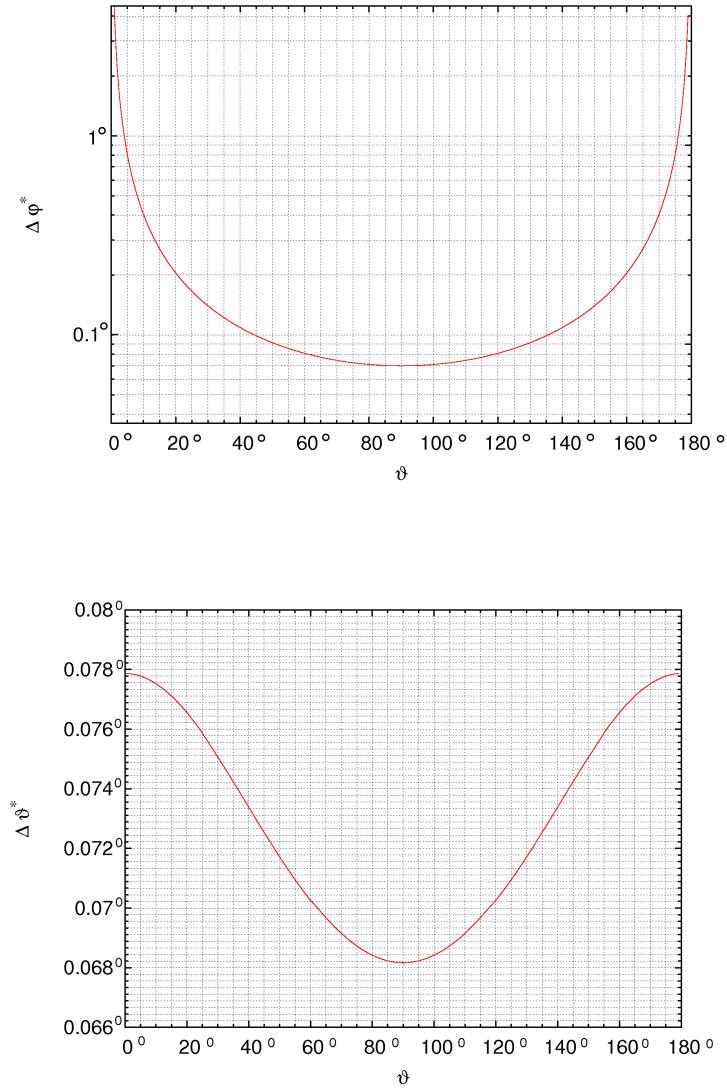


Abbildung 4.25: Winkelunsicherheit von $\Delta\varphi_{\max}$ und $\Delta\vartheta_{\max}$ in Abhängigkeit von ϑ

Dies ist ein interessantes Ergebnis für die Winkelgenauigkeit von AMADEUS, könnte man doch mit einer Präzision von etwa 0.1° Signale detektieren. Es muss allerdings noch mehr Arbeit investiert werden, um das Stockwerk besser zu verstehen (siehe Abbildung 4.20). Dies verdeutlicht auch noch einmal das nächste Kapitel.

4.8 Bestimmung der Stockwerkspositionen über Winkelvermessungen

Bisher ist die bestmögliche Auflösung nur für einen kleinen Raumwinkelbereich gültig. Würde diese für alle Richtungen gelten, stellt sich die Frage wie gut man damit Stockwerke positionieren kann.

4.8.1 Bestimmung der bestmöglichen Auflösung der Stockwerkspositionierung (Simulation)

Die bestmögliche Auflösung der Stockwerkspositionierung, d.h. Orts-, Akustik-Kompass und Akustik-Tilt Rekonstruktion (Definition siehe Kapitel 3.2.2), wird mit Hilfe einer Simulation bestimmt. Grundlage dafür ist das in Kapitel 3.2 abgehandelte Verfahren und die in Abschnitt 4.7.1 gewonnene Winkelauflösung. Die Genauigkeit der Positionierung ist sehr stark abhängig von der Anzahl der Pinger aber auch von der Position und dem Abstand des Stockwerks zu den untersuchten Pingern. In der Realität muss man zusätzlich mit einer variablen Zahl von rekonstruierten Pingernsignalen rechnen. Ursachen sind Interferenzen und Abschottungseffekte, aber auch Pinger, die über einen längeren Zeitraum inaktiv sind. In der Simulation werden vor jeder Rekonstruktion die Richtungen \hat{w}_i (Definition siehe Kapitel 3.2.1) abhängig von der Winkelauflösung gaußverteilt variiert. Das Stockwerk 2 soll sich dabei 180 m senkrecht über der eigenen BSS befinden, d.h ohne Verkippung. Nach mehreren tausend Läufen entsteht eine Verteilung für die rekonstruierten Positionen \vec{X}^* und Ausrichtungen des Stockwerks $\vec{\alpha}^*$. Exemplarisch wird die Bestimmung für ein typisches Beispiel mit 7 Pingern¹⁵ demonstriert.

¹⁵Pinger 1 bis 7 der Reihenfolge nach (Positionen der Pinger siehe Abbildung 4.1)

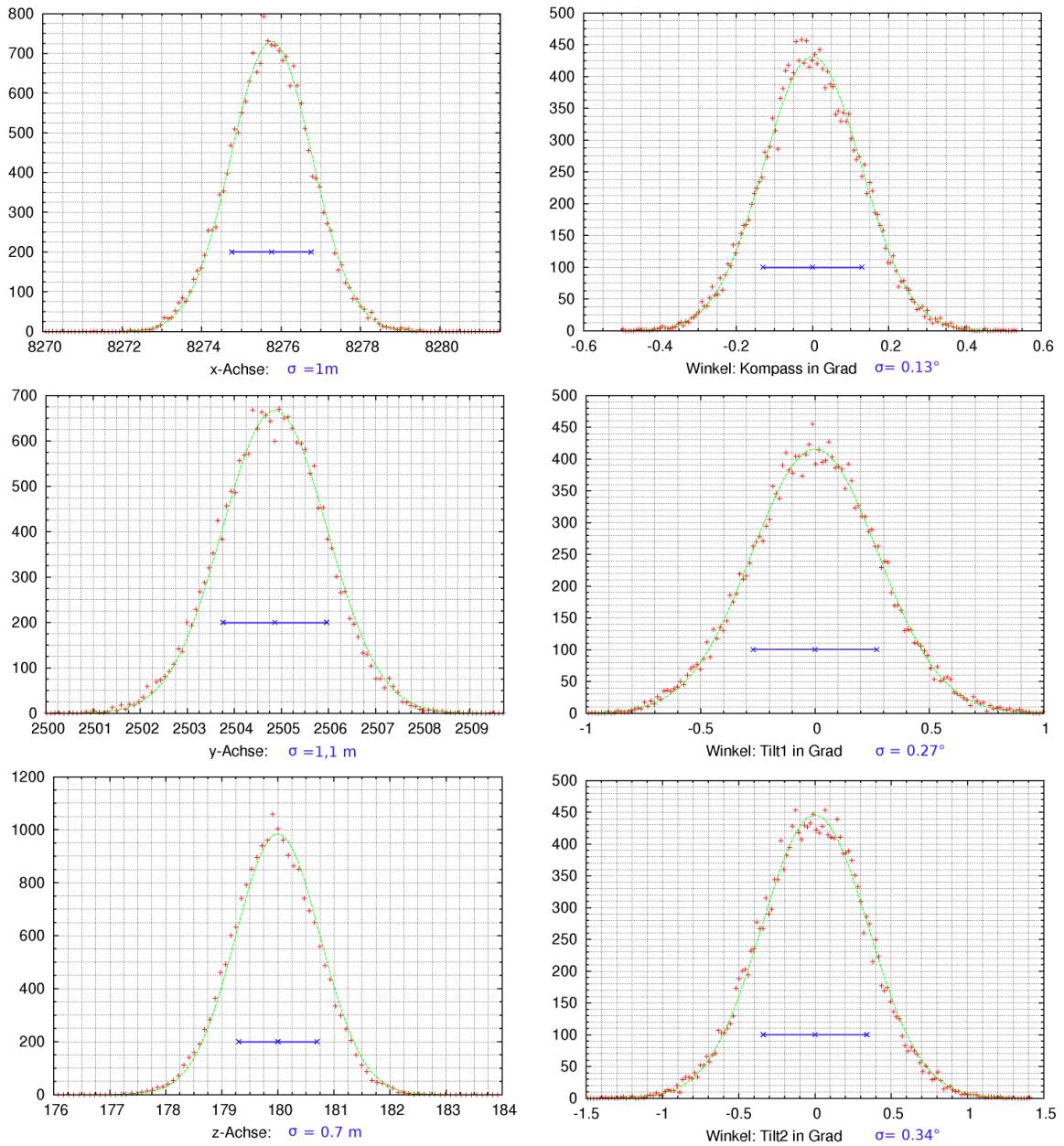


Abbildung 4.26: Simulation: Bestimmung der Positionierungsauflösung von Stockwerk 2, bei idealer Winkelauflösung und 7 Pingern

Ergebnisse:

α_1 : Akustik-Kompass
 α_2 : Akustik-Tilt1
 α_3 : Akustik-Tilt2

Tabelle 4.4: gerundeter Fehler auf 180 m Stockwerkshöhe (Stockwerk 2)

180 m	12 Pinger	7 Pinger	4 Pinger
Δx	0.7 m	1 m	3 m
Δy	0.6 m	1.1 m	2.3 m
Δz	0.6 m	0.7 m	1.1 m
$\Delta \alpha_1$	0.1°	0.1°	0.3°
$\Delta \alpha_2$	0.2°	0.3°	0.9°
$\Delta \alpha_3$	0.2°	0.3°	0.7°

Tabelle 4.5: gerundeter Fehler auf 420 m Stockwerkshöhe (Stockwerk 6)

420 m	12 Pinger	7 Pinger
Δx	4.7 m	8.7 m
Δy	4.7 m	10.7 m
Δz	2.3 m	3.3 m
$\Delta \alpha_1$	0.2°	0.3°
$\Delta \alpha_2$	0.6°	1.2°
$\Delta \alpha_3$	0.6°	1.5°

Die Standardabweichung liegt für alle Ortskoordinaten im besten Fall (d.h. der kleinst möglichen Höhe, beste Winkelauflösung, große Anzahl von Pingern) bei etwa 0.7 m. Dies ist im Vergleich zur Laufzeitmethode, wie sie standardmäßig bei ANTARES verwendet wird, zu schlecht. Eine ausreichend gute Ortsrekonstruktion ist mit einer realistischen Anzahl von Pingern, bei selbst bester Winkelauflösung nicht möglich.

Die Ergebnisse der Winkelmessungen, zur Bestimmung der Ausrichtung des Stockwerks, sind besser. Bei jeweils 7 Pingern könnte eine Genauigkeit für den Akustik-Kompass zwischen 0.1° (Stockwerkshöhe: 180 m) und 0.3° (Stockwerkshöhe: 420 m) erreicht werden. Für Tiltdata schwankt die Genauigkeit zwischen 0.3° (Stockwerks-höhe: 180 m) und knapp 1.5° (Stockwerkshöhe: 420 m).

4.8.2 Orts-, Kompass- und Tiltrekonstruktion an Realdaten

Ziel dieses Abschnittes ist es die Genauigkeit der Stockwerkspositionierung zu bestimmen. Diese liefert wiederum rückschließend Aussagen zur Qualität der Richtungsrekonstruktionen der Pinger. Nach deren Bestimmung werden die Ergebnisse der Stockwerks-Positionierung grafisch dargestellt und analysiert.

Bei der Positionierung hat man es mit ein paar prinzipiellen Problemen zu tun. Wie schon erwähnt sind in der Realität etwa 30 % aller Daten nicht verwendbar. Das liegt hauptsächlich an der Deaktivierung übereinander liegender Hydrophone und der daraus folgenden Spiegellösungen. Werden diese ausgesiegt, bleiben im Durchschnitt 7 bis 8 Pinger pro Rekonstruktion übrig. Die Winkelauflösung gilt desweiteren nur für einen bestimmten Winkelbereich. Hier lag das Optimum zwischen -25° und $+5^\circ$. Dies führt dazu, dass Richtungsrekonstruktionen welche nicht in diesem Bereich liegen, einen systematischen Fehler aufweisen.

In der Praxis muss man deshalb einen Kompromiss finden, wenn es um die Auswahl der Pinger geht: Zwar führen mehr Pinger zu einer größeren Genauigkeit, jedoch verfälschen die Richtungsrekonstruktionen das Ergebnis, deren Abstandsquadrat $\min(f_1)$ (siehe Gleichung 4.3.1) zu schlecht war. Werden umgekehrt zu viele Richtungsrekonstruktionen aussortiert, fehlen am Ende die Daten, um eine Lokalisierung des Stockwerks zu ermöglichen. In Abbildung 4.27 werden zwei Abstandsquadrat Verteilungen $\min(g)$, aus Realdaten gezeigt, zum einen die Verteilung aus allen rekonstruierten Pingesignalen, zum anderen jene, deren Abstandsquadrat $\min(f_1)$ schlechter war (d.h. $\min(f_1) > 10^{-11} \text{ s}^2$).

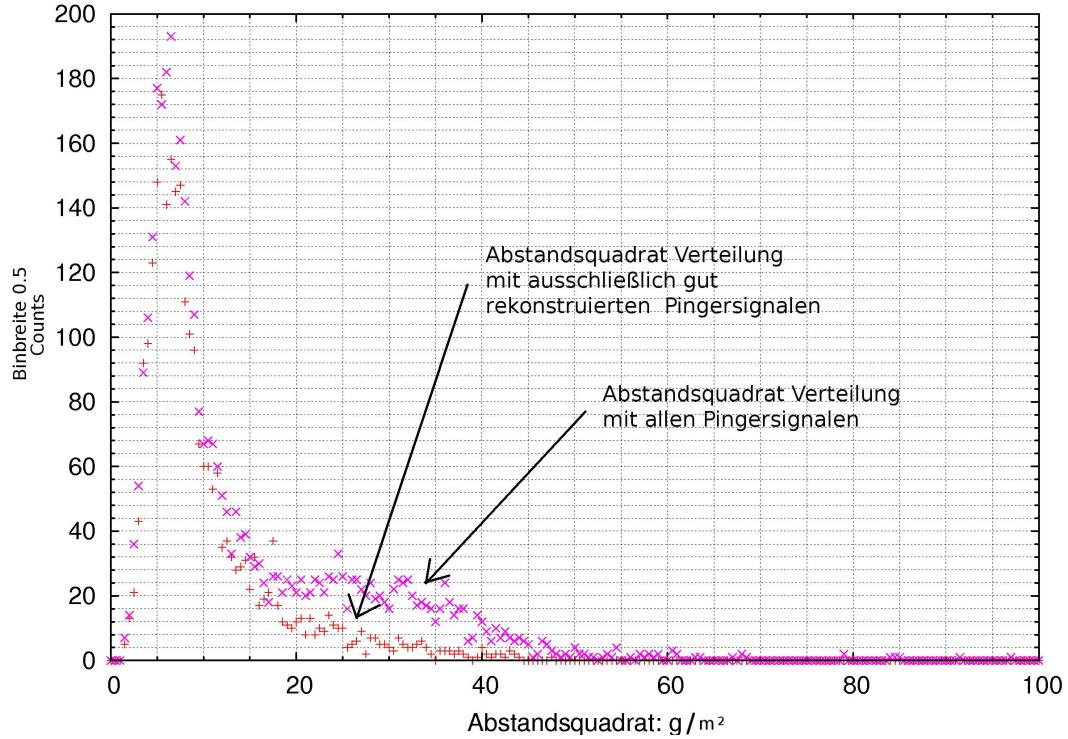
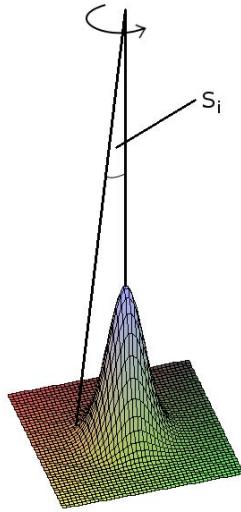


Abbildung 4.27: Abstandsquadrat-Verteilungen $\min(g)$, rekonstruiert mit unterschiedlich guten Pingersignalen

Vergleicht man diese Verteilung mit simulierten Daten, d.h. der besten Winkelauflösung aus Kapitel 4.7.1, ist sie zu schlecht. Der ungefähre Peak bei Realdaten liegt bei 5 m, der von simulierten Daten bei 50 cm. Des Weiteren lässt sich diese Verteilung nicht exakt durch eine Simulation annähern. Dies stützt die Vermutung, dass systematische Fehler auftreten. Um Aussagen für die maximale und gemittelte Winkelunsicherheit zu erhalten, wird folgendes Verfahren angewandt.

Die Vektoren (siehe Abschnitt 3.2.1) $\vec{w}_i = \hat{\vec{w}}_i \cdot |\vec{v}_i|$ und \vec{v}_i besitzen durch die gemessenen Unsicherheiten nie die gleiche Orientierung. Die Vermutung ist, dass die gemessene Verteilung $(\vec{w}_i - \vec{v}_i)$, um jeden einzelnen Pinger genähert eine zweidimensionale, rotations-symmetrische Gauß'sche Glockenkurve ergibt. In letzterer steckt die komplette Information über die Winkelunsicherheit. Diese könnte man über die Breite der Glockenkurve, zusammen mit dem Abstand $|\vec{w}_i|$ erhalten. Jedoch wird wegen der zu geringen Datenmenge ein abgewandeltes Verfahren benutzt.



Über die Gauß'sche Glockenkurve wird die Wahrscheinlichkeitsdichte¹⁶ $p(r)$ berechnet, da diese die Verteilung des Abstandes $|\vec{w}_i - \vec{v}_i|$ über viele Rekonstruktionen beschreibt. Mit Hilfe dieser lässt sich schließlich die Standardabweichung u_i ermitteln. Hat man diese wiederum bestimmt, ist es möglich die Winkelunsicherheit ΔS_i zu berechnen.

In Zylinderkoordinaten gilt:

$$p(r) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi u^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2u^2}\right) \cdot r \, d\psi = \frac{1}{u^2} \cdot r \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2u^2}\right) \quad (4.8.1)$$

$$\text{mit: } \int_0^{\infty} p(r) \, dr = 1 \quad \text{und} \quad \int_0^u p(r) \, dr \approx 0.39 \quad (4.8.2)$$

Versucht man sich an einem Fit der Verteilung von $|\vec{\omega}_2 - \vec{v}_2|$ (Pinger Nr.2), dann liefert dieser noch kein besonders gutes Ergebnis¹⁷.

¹⁶Die Verteilung $p(r)$ wird auch Rayleighverteilung genannt

¹⁷geringe Datenrate

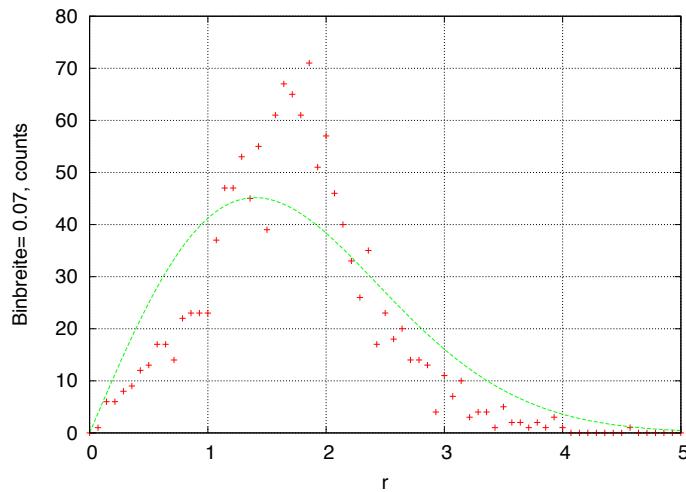


Abbildung 4.28: Verteilung von $|\vec{w}_2 - \vec{v}_2|$ (Pinger 2)

Um trotzdem eine Näherung für den Fehler zu erhalten, wird bei dieser Verteilung numerisch abgezählt, ab welchem Wert 39 % der Rekonstruktionen¹⁸ innerhalb des Radius r lagen. Als Ergebnis stellt sich gerundet heraus: $u_2 \approx 1.5$ m

Die Verteilungen um die restlichen Pinger verhalten sich gaußförmiger. Als Beispiel dient Pinger 7:

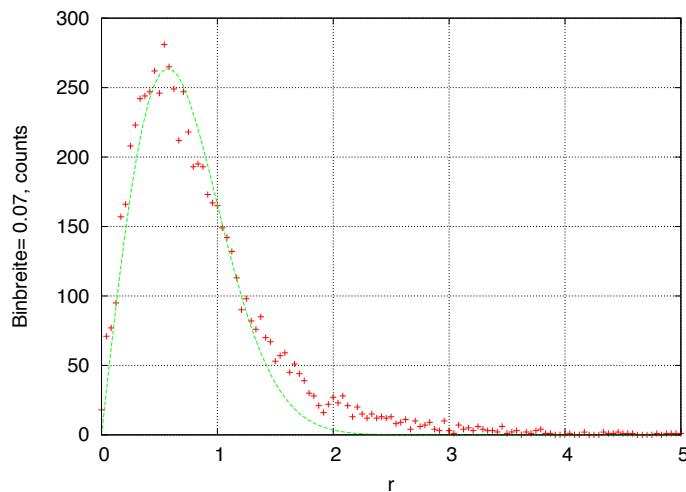


Abbildung 4.29: Verteilung $|\vec{w}_7 - \vec{v}_7|$ (Pinger 7)

¹⁸siehe Gleichung 4.8.2

Der Fit liefert den Wert $u_7 \approx 0.6$ m, numerisch ergibt sich auf der anderen Seite $u_7 \approx 0.7$ m. Für die Winkelunsicherheit dieser beiden Spezialfälle bedeutet dies, wenn man die schlechter ausfallenden numerischen Werte einsetzt:

$$\Delta S_2 = 0.5^\circ \approx \tan^{-1} \left(\frac{1.5 \text{ m}}{190 \text{ m}} \right)$$

$$\Delta S_7 = 0.2^\circ \approx \tan^{-1} \left(\frac{0.7 \text{ m}}{246 \text{ m}} \right)$$

Alle anderen Winkelunsicherheiten bewegen sich etwa in der gleichen Größenordnung wie ΔS_7 . Für den gemittelten Wert aller, ergibt sich ein Wert von $\overline{\Delta S} \approx 0.2^\circ$. Wird nun statt der idealen Zeit/ideale Winkelunsicherheit, immer die gleiche Winkelunsicherheit mit der Auflösung von 0.2° Grad in eine Simulation eingesetzt, erhält man die ungefähren Werte für die tatsächliche Stockwerksauflösung bei 7 Pingern¹⁹.

Tabelle 4.6: Fehler (gerundet) auf 180 m Stockwerkshöhe und 7 Pingern

180m	Auflösung
Δx	≈ 1.6 m
Δy	≈ 1.6 m
Δz	≈ 1.6 m
$\Delta \alpha_1$	$\approx 0.3^\circ$
$\Delta \alpha_2$	$\approx 0.8^\circ$
$\Delta \alpha_3$	$\approx 0.8^\circ$

¹⁹Es wurde angenommen, dass die Pinger von 1 bis 7 der Reihe nach Signale abgeben

Die folgenden Abbildungen wurden so erstellt, dass mindestens 7 Pinger vorhanden sein mussten und bei der Richtungsrekonstruktion $\min(f_1) < 10^{-11} \text{ s}^2$ gelten sollte.

Die folgenden Daten wurden beginnend am 16.09.2008 um 14:00 aufgezeichnet. Die Zeittdauer betrug 3 Tage und 5 Stunden, wobei auf der Abszisse die Unixzeit²⁰ aufgetragen wurde.

²⁰Zeit in Sekunden seit dem 1. Januar 1970 um 00:00 (UTC)

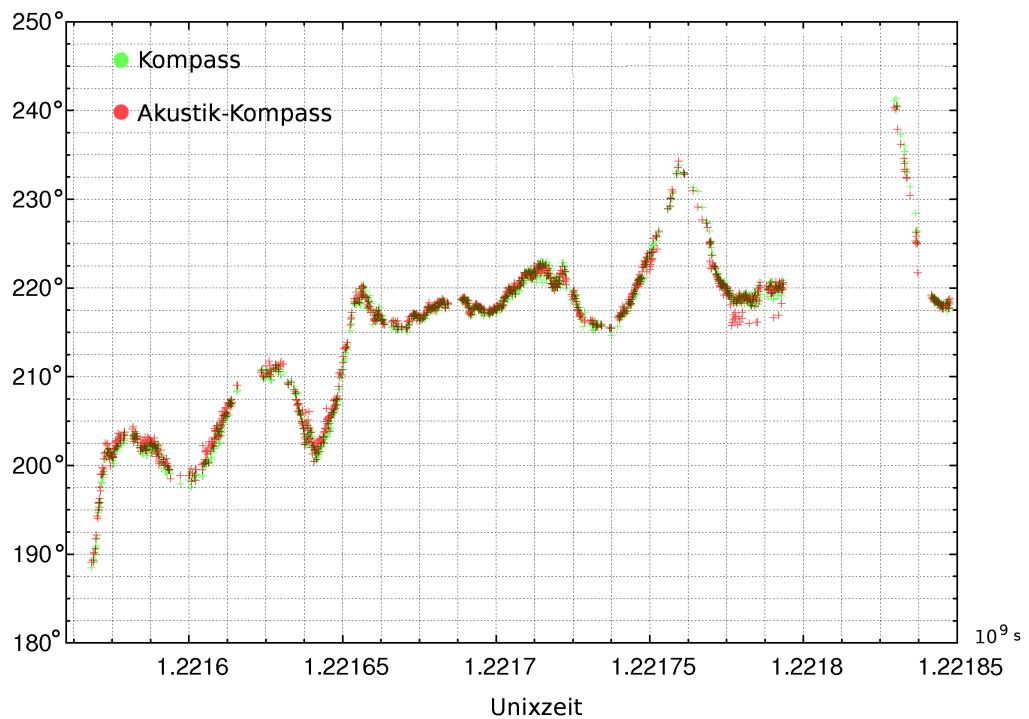


Abbildung 4.30: Vergleich: Akustischer Kompass - Magnet Kompass

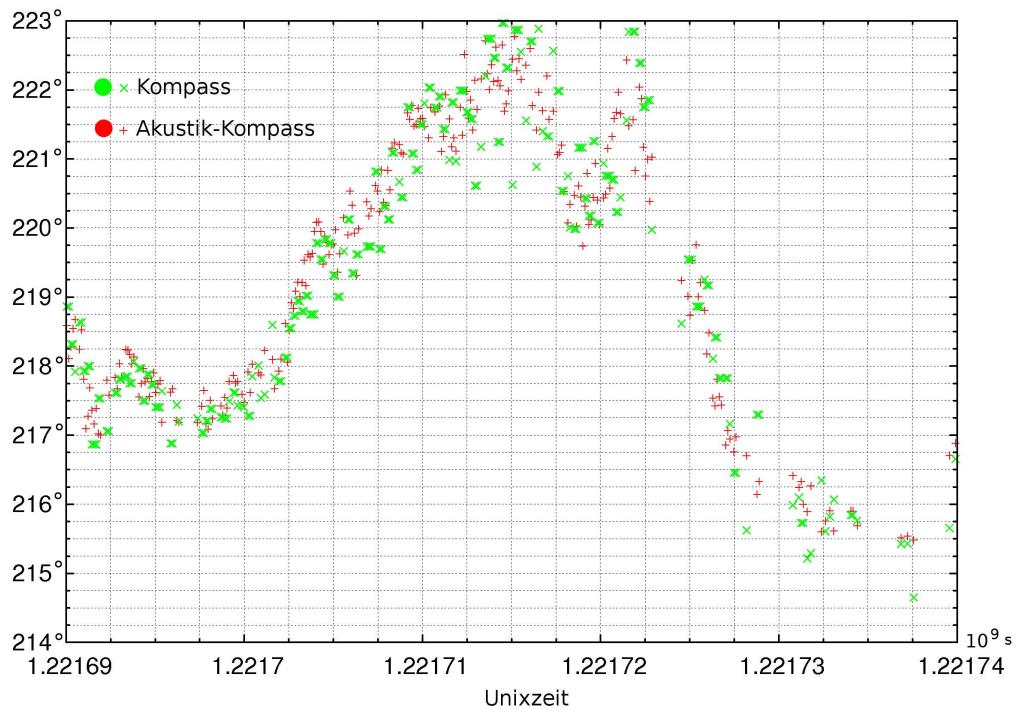


Abbildung 4.31: Zoom: Akustischer Kompass - Magnet Kompass

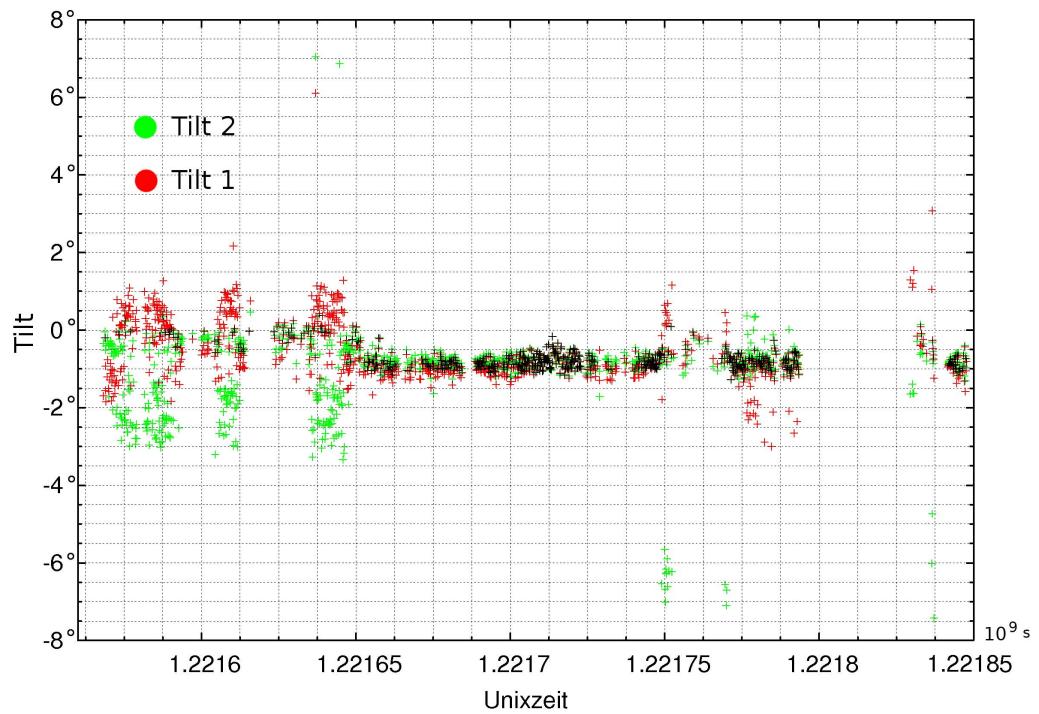


Abbildung 4.32: Akustik-Tiltdaten: Tilt1, Tilt2

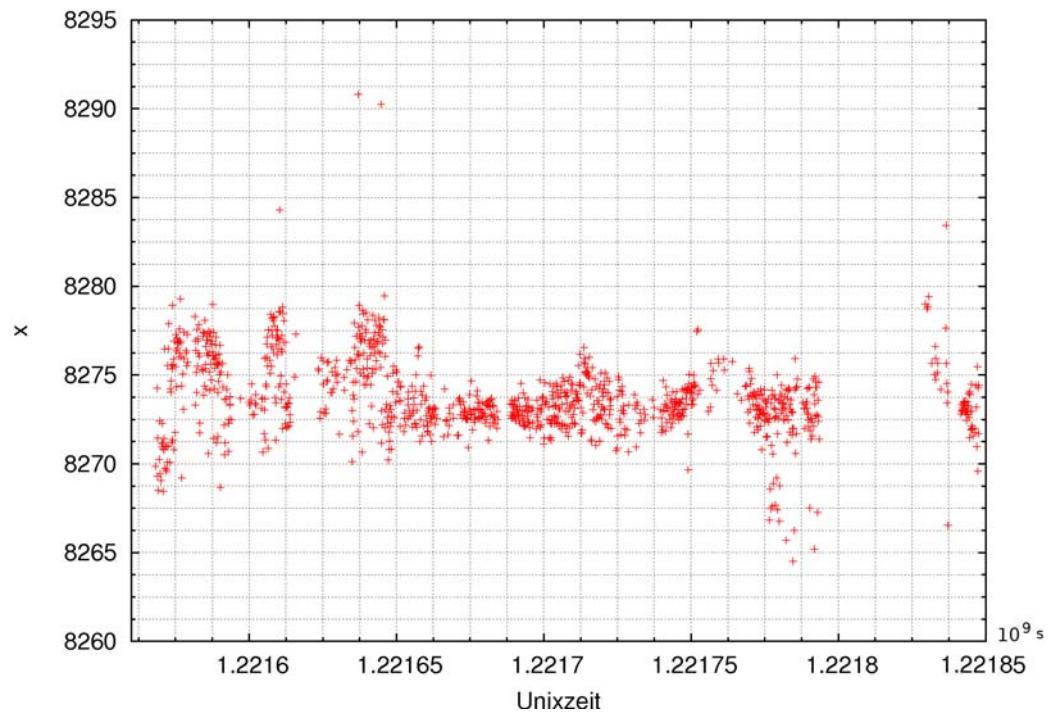


Abbildung 4.33: Akustik: x- Rekonstruktion

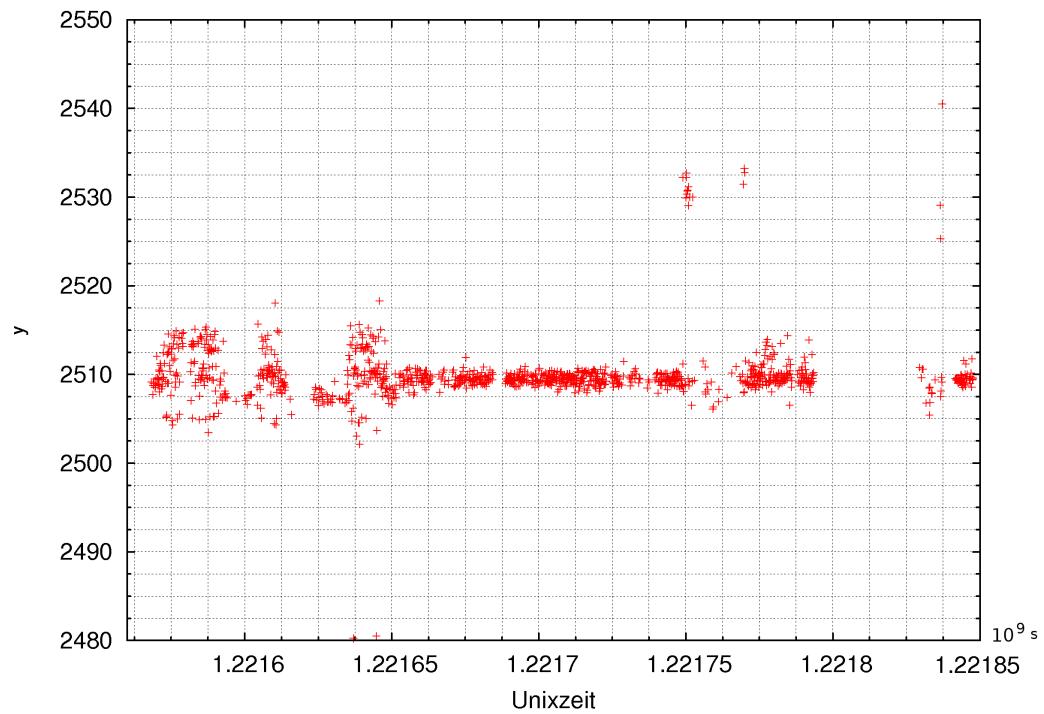


Abbildung 4.34: Akustik: y- Rekonstruktion

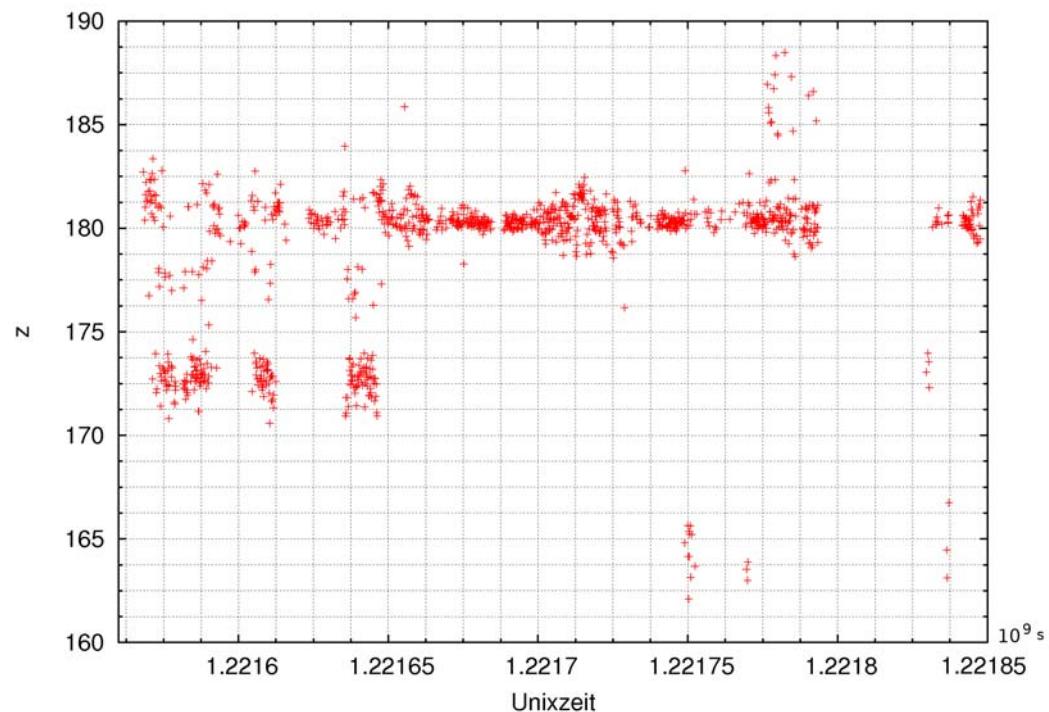


Abbildung 4.35: Akustik: z- Rekonstruktion

Wenn man mit “bloßem Auge” (siehe Abbildung 4.31) den Akustik-Kompass und den magnetischen Kompass vergleicht, stellt man fest, dass die Akustik mindestens genauso gut ist. Diese Vermutung wird durch Tabelle 4.6 untermauert.

Auf der anderen Seite gibt es vom Beginn der Rekonstruktionen bis zum Zeitpunkt von etwa 1.22165×10^9 s große Auslenkungen im Bereich der Ortskoordinaten und des Akustik-Tilts. Erklärbar wären beispielsweise die schnell einsetzenden Höhenschwankungen von bis zu 8 Metern nur durch extrem starke Strömungen. Betrachtet man aber Abbildung 4.36, erkennt man genau zu diesen Zeitpunkten eine erhebliche Verschlechterung der Abstandsquadrate $\min(g)$.

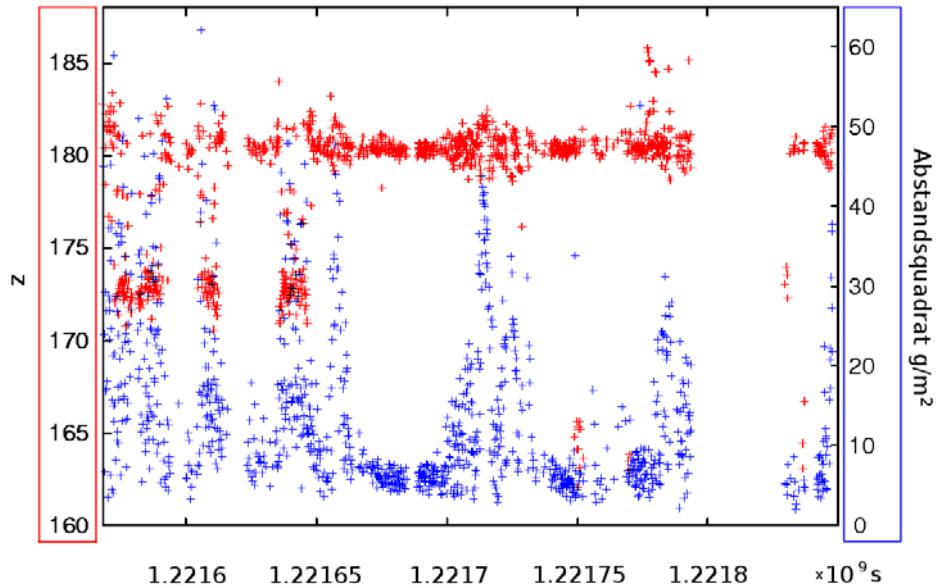


Abbildung 4.36: Zeitverlauf der Stockwerkshöhe z und des Abstandsquadrates $\min(g)$

Ein Indiz für die wahren Ursachen findet man in Abbildung 4.37. Eingetragen sind die rekonstruierten Höhen zusammen mit der Anzahl der für die Positionierung verwendeten Pinger. In der Zeit starker Auslenkung waren für die Rekonstruktionen immer zwischen 7 und 9 Pinger beteiligt, wohingegen beim Rest fast nur 7 verwendet wurden.

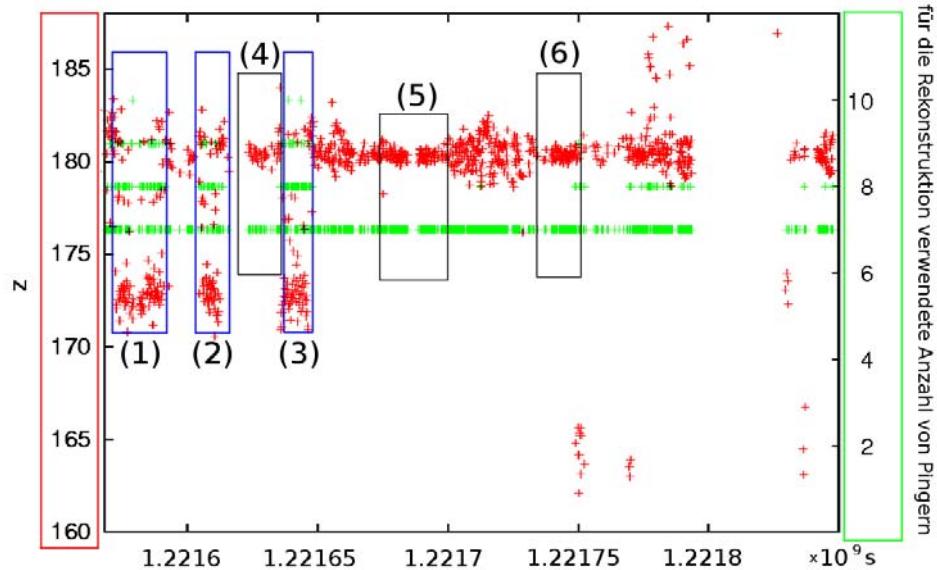


Abbildung 4.37: Rekonstruierte Höhe z in Abhängigkeit der Zeit. Die jeweils für eine Rekonstruktion verfügbare Anzahl an Pingern wurde mit aufgetragen

Im Folgenden wird untersucht, welche Pinger in Abhängigkeit von der Zeit in die Rekonstruktionen eingeflossen sind. Die untersuchten Zeitbereiche sind in Abbildung 4.37 markiert:

Tabelle 4.7: Für die Positionierung benutzte Pinger in den Zeitfenstern von (1) bis (6)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	IL07	Pyramide
(1)(2)(3)	-	-	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
(4)(5)(6)	-	-	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	-

Die Pinger der BSS 4, BSS 10 und der Pyramide fehlen in den Rekonstruktionsbereichen (4)(5)(6) im Gegensatz zu (1)(2)(3) komplett. In den Bereichen (1)(2)(3) sind auf der anderen Seite die Abstandsquadrate schlechter als sonst. Die Vermutung ist, dass mindestens einer dieser Pinger die Rekonstruktionen verschlechtert. Testet man dies mit einer neuen Rekonstruktion und lässt all diese Pinger weg, erhält man Abbildung 4.38.

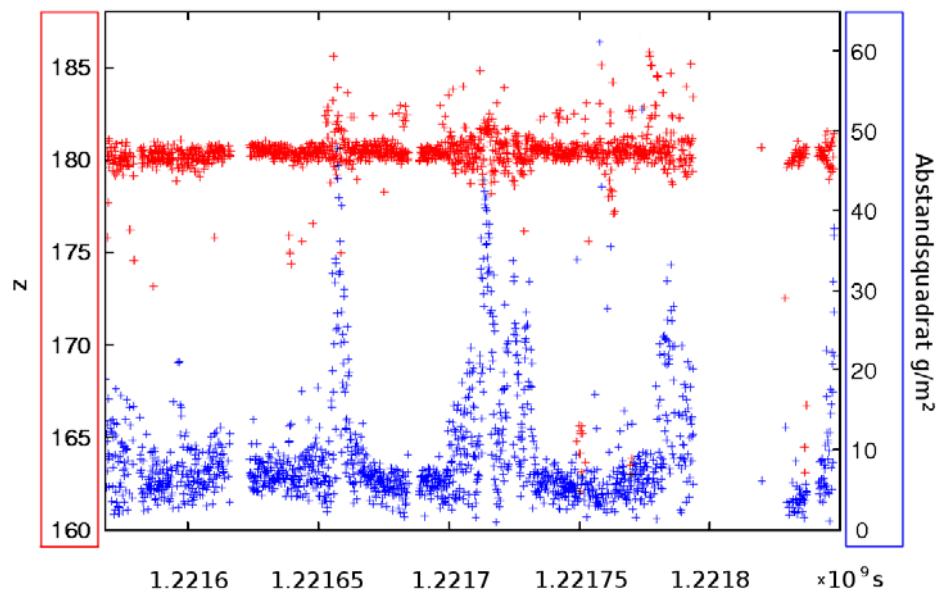


Abbildung 4.38: Selbe Graph wie auf Abbildung 4.36, wobei bei der Positionierung die Pinger der BSS 4, BSS 10 und der Pyramide ignoriert wurden

Die Positionierung läuft nun im Vergleich zu vorher viel besser ab. Dies wirkt sich für alle Koordinaten und Tiltdataen im gleichen Maße aus.

Eine der denkbaren Ursachen wäre, dass diese nominal angegebenen Koordinaten mit den realen Pingerpositionen nicht übereinstimmen. Dies ist aber reine Spekulation und müsste daher weiter erforscht werden, was aber nicht mehr im Rahmen dieser Diplomarbeit liegt.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Wie man in den vorhergehenden Kapiteln sieht, ist die Kenntnis der Hydrophonpositionen Grundlage für eine genaue Richtungsrekonstruktion von Schallquellen. Man kann sich damit begnügen, die Rekonstruktionen auf ein paar Grad Genauigkeit anzugeben. Die Möglichkeit einer besseren Auflösung ist dennoch vorhanden. Über Pinger lassen sich die Hydrophonpositionen berechnen. Deren Positionsbestimmung lief nur für einen bestimmten Winkelbereich besonders gut (Abbildung 4.20). Die genaue Ursache dafür liegt aber noch im Dunkeln.

Abschottungseffekte aber auch Interferenzen am Stockwerk verformen oft die Signalform. Diese betrifft in den meisten Fällen zwei übereinander liegende Hydrophone, was zwangsläufig bei einer Richtungsrekonstruktion zu einer Spiegellösung führt. Um dieses Problem bei zukünftigen Projekten zu umgehen, gibt es sicherlich mehrere Möglichkeiten. Abschottungseffekte wird es wohl bei jeder Geometrie geben. Jedoch sollte erreicht werden, dass davon gleichzeitig nur wenige Hydrophone betroffen sind. Bei der derzeitigen Geometrie der AMADEUS Stockwerke hätte es wohl gereicht, die unteren Hydrophone um 60° zu verdrehen. Damit wäre immer gewährleistet, dass alle Hydrophone linear unabhängig voneinander arbeiten, falls 2 Hydrophone ausfallen.

Die Winkelauflösung des Stockwerks ist neben der beschränkten Anzahl von Pingern, der limitierende Faktor für eine Orts- und Richtungsbestimmung über Winkelvermessungen. Erinnert man sich an die Fasskreisbögen in Abbildungen 3.6 und 3.7, ist das einleuchtend. Je höher sich die Stockwerke befinden, desto kleiner werden die Winkel δ_1 und δ_2 . Damit wird die Auflösung schlechter. Die simulierten Daten zeigen, dass die Positionsbestimmung über Winkelvermessungen der Laufzeitmethode¹ unterlegen ist. Jedoch zeigt sich auch, dass die Stockwerksorientierung (Akustik-Kompass, Akustik-Tilt) gut bestimmbar ist.

Für die Überprüfung der nominal angegebenen Pingerkoordinaten bieten sich Gegenproben über Winkelvermessungen an. Über drei Pinger und den entsprechenden Laufzeiten könnte man die Position des Akustik Stockwerks bestimmen, über Richtungsrekonstruktionen eine Überprüfung der restlichen Pingerkoordinaten durchführen.

¹diese liegt im cm Bereich

Literaturverzeichnis

- [1] F. Reines and C.L. Cowan. The Neutrino. *Nature*, 178:446–449, 1956.
- [2] C. L. Cowan, F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, and A. D. McGuire. Detection of the free neutrino: A Confirmation. *Science*, 124:103-104, 1956.
- [3] C. Amsler et al. Review of particle physics. *Physics Letters*, B667:1, 2008.
- [4] Thomas Schwetz, Mariam Tortola, Jose W.F. Valle. Three-flavour neutrino oscillation update. arXiv:0808.2016v2, 2008.
- [5] Raj Gandhi, Chris Quigg, Mary Hall Reno, and Ina Sarcevic. Neutrino interactions at ultrahigh energies. *Physical Review D*, 58:093009, 1998.
- [6] Q.R. Ahmad, R.C. Allen, T.C. Andersen, et al. Measurement of Day and Night Neutrino Energy Spectra at SNO and Constraints on Neutrino Mixing Parameters. arXiv:nucl-ex/0204009v2, 2002.
- [7] E. Fermi: Phys. Rev. 2nd ser., 75, no 8, 1169 (1949)
- [8] Bernd Heber, Wolfgang Dröge, Berndt Klecker und Gottfried Mann. Die Sonne als Teilchenbeschleuniger. *Physik Journal 6 Nr. 3*, 2007.
- [9] M.A. Malkov, P.H. Diamond. Modern theory of Fermi acceleration: a new challenge to plasma physics. arXiv:astro-ph/0102373v1, 2001.
- [10] Constantino Tsallis, Joao C. Anjos, and Ernesto P. Borges. Fluxes of cosmic rays: A delicately balanced stationary state. *Physics Letters A*, 310:372, 2003.
- [11] Robert C. Duncan. Triggers of magnetar outbursts. arXiv:astro-ph/0401415v1, 2004.
- [12] Bettina Hartmann. Reconstruction of Neutrino-Induced Hadronic and Electromagnetic Showers with the ANTARES Experiment. Dissertation, FAU-PI1-DISSERTATION-06-001, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006.
- [13] Claudio Kopper. Energierekonstruktion von hochrelativistischen Myon-Neutrinos mit dem Wasser-Cherenkov-Detektor ANTARES. Diplomarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.

[14] Kay Graf. Teststrahlmessungen zur akustischen Neutrinodetektion: Thermoakustische Schallerzeugung in Wasser. Diplomarbeit, FAU-PI1-DIPL-04-002, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2004.

[15] G. A. Askarian. *At. Energ.*, 3:152, 1957.

[16] G. A. Askarian, B. A. Dolgoshein, A. N. Kalinovsky, and N. V. Mokhov. Acoustic detection of high energy particle-showers in water. *Nucl. Instrum. Meth.*, 164:267–278, 1979.

[17] C-T. Chen and F.J. Millero. Speed of sound in seawater at high pressures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 62(5), 1129-1135, 1977.

[18] V.Niess. Underwater Acoustic positioning in ANTARES. <http://antares.in2p3.fr/Publications/conferences/2005/niess-icrc05-paper-positioning.pdf>, 2005.

[19] V. Niess. Underwater acoustic positioning in ANTARES. Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference. Pune, India, August 3-10, 2005.

[20] Carsten Richardt. Acoustic Particle Detection and point source reconstruction, Diplomarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006.

[21] J.J. Christensen and J. Hald. Beamforming. Technical Review, 2004.

[22] Carsten Richardt. Position reconstruction of acoustic sources with the AMADEUS Detector, Arena08, Rome June 27th, 2008.

Danksagung:

Jetzt bin ich doch noch am Ende meiner Diplomarbeit gelandet und es bleibt nur noch ein kräftiges Dankeschön an all die Leute zu sagen, die mich bis zum Ziel begleitet haben. Insbesondere danke ich meiner Familie und auch meiner Freundin Julia, die mir während des Schreibens viele anderweitige Arbeit abgenommen haben und sehr verständnisvoll waren.

Ich kann sicherlich nicht jeden erwähnen, der am eigentlichen Entstehungsprozess beteiligt war, möchte aber die wichtigsten nennen:

An erster Stelle steht Prof. Dr. Uli Katz, der mir diese Diplomarbeit ermöglichte und sofern er nicht für KM3Net unterwegs war, immer ein offenes Ohr hatte. Er und Frau Prof. Dr. Gisela Anton stecken mit ihrem großen Engagement jeden Mitarbeiter im Institut an.

Vor allem möchte ich mich auch bei denen bedanken, die direkt am Entstehungsprozess dieser Arbeit beteiligt waren:

Dazu gehören vor allem Carsten Richardt, Kay Graf und Robert Lahmann.

Ohne ihre Hilfe und Anregungen wäre die Diplomarbeit nur zur Hälfte, wenn überhaupt fertiggestellt worden. Insbesondere danke ich Robert Lahmann noch einmal für die gute Betreuungsarbeit.

Ich versichere, diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben.

Erlangen, im Januar 2009

Sebastian Brehm: _____