

Untersuchungen zur Optimierung der Signalselektion mit dem akustischen Teilchendetektor AMADEUS

Bachelorarbeit aus der Physik

Vorgelegt von
Johannes Link
22.7.2016

Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Betreuer: PD Dr. Robert Lahmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Neutrinodektektion	2
2.1	Neutrinos	2
2.2	ANTARES/AMADEUS	2
2.3	Akustische Neutrinodektektion	3
3	Theoretische Grundlagen zur Signalverarbeitung	6
3.1	Fouriertransformation	6
3.2	Kreuzkorrelation	6
3.3	Spektrale Leistungsdichte	7
3.4	Matched Filter (Optimalfilter)	7
3.5	Signal-Rausch-Verhältnis	9
4	Simulationsstudien	11
4.1	Untersuchung des Matched Filters	11
4.2	Winkelabhängigkeit des Pulses und Antwort der Elektronik	16
4.3	Digitalisierungseffekte	19
5	Zusammenfassung und Ausblick	22

1 Einleitung

Noch heute, über 80 Jahre nachdem Wolfgang Pauli sehr leichte neutrale Teilchen postulierte, um den radioaktiven Betazerfall korrekt erklären zu können, sind diese Teilchen eines der größten Rätsel der Physik. Mittlerweile ist etwas über die Neutrino genannten Teilchen bekannt, beispielsweise dass es drei verschiedene Flavours gibt. Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass die Neutrinos zwischen diesen Flavours oszillieren, wofür Takaaki Kajita und Arthur B. McDonald 2015 den Nobelpreis für Physik erhielten. Daraus konnte gefolgert werden, dass Neutrinos eine nicht-verschwindende Masse besitzen. Allerdings bleiben noch viele Fragen offen. So ist weiterhin die Frage nach der exakten Neutrinomasse und warum sie so verschieden zu allen anderen Elementarteilchen sind ungeklärt.

Deshalb werden auch heute noch neue und immer größere Neutrinodetektoren gebaut, um die verbleibenden Unklarheiten über die Neutrinos aus der Welt zu schaffen und vor allem um mehr über die Neutrinoquellen im Universum herauszufinden. Denn aufgrund ihrer geringen Wechselwirkung eignen sich Neutrinos sehr gut, um mit ihnen Astronomie zu betreiben. Einer dieser Detektoren wurde auf dem Grund des Mittelmeeres errichtet und versucht die Neutrinos nicht, wie meist üblich, mit Tscherenkow-Strahlung nachzuweisen sondern akustisch. Der Grund dafür ist, dass mit der akustischen Neutrinodetektion das Nachweisvolumen vergrößert werden kann, was es ermöglicht geringere Neutrinoflüsse wie beispielsweise von hochenergetischen Neutrinos zu detektieren. Da sich in der Tiefsee noch viele andere Quellen akustischer Signale befinden, ist es eines der Probleme die Signale der Neutrinos aus diesem Hintergrundrauschen zu filtern. Typischerweise geschieht dies mit Hilfe einer Kreuzkorrelation, die an das Signal der Neutrinos angepasst ist, aber für weißes Rauschen ausgelegt ist. Da das Rauschen allerdings nicht weiß ist, sondern eine frequenzabhängige spektrale Leistungsdichte hat, soll im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, ob die Verwendung eines sogenannten Matched Filters eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses im Vergleich zur Kreuzkorrelation nach sich zieht.

2 Neutrinodektektion

2.1 Neutrinos

Neutrinos sind Elementarteilchen sehr geringer Masse, die sich mit nahezu Vakuumlichtgeschwindigkeit bewegen [7]. Außerdem wechselwirken sie nur durch die schwache Wechselwirkung mit Materie und besitzen einen sehr geringen Wirkungsquerschnitt. Für Neutrinos mit einer Energie von $10^{16} \text{ eV} \leq E_\nu \leq 10^{21} \text{ eV}$ beläuft sich dieser auf etwa [8]:

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

Daher sind sehr große Volumina notwendig, um Neutrinos in einer für die Forschung sinnvollen Anzahl nachweisen zu können. Dies macht sie allerdings auch besonders interessant, da sie dadurch sehr große Strecken zurücklegen können, ohne abgelenkt zu werden. Mit Hilfe von Neutrinodektoren soll mehr über hochenergetische kosmische Strahlung und damit über Beschleunigungsmechanismen im Weltall herausgefunden werden [3].

2.2 ANTARES/AMADEUS

Etwa 40 km vor der Küste von Toulon befindet sich in etwa 2500 m Tiefe am Grund des Mittelmeers der Neutrinodektor ANTARES (**A**stronomy with a **N**eutrino **T**elelescope and **A**byss environmental **R**ESearch) [1]. Dabei wird durch Photomultiplier die von Myonen abgestrahlte Tscherenkow-Strahlung als indirekter Nachweis von Reaktionen zwischen Myon-Neutrinos und Materie gemessen. Tscherenkow-Strahlung wird von geladenen Teilchen emittiert, wenn sich diese schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Medium bewegen. Der Aufbau von ANTARES ist in Abbildung (1) zu sehen. Der Detektor besteht aus 12 Lines, die im Meeresboden verankert sind und durch Böjen in vertikaler Position gehalten werden. Jede dieser Lines besteht aus 25 sogenannten Stockwerken, die jeweils eine Messeinheit bestehend aus drei Photomultipliern enthalten [11]. Einige der Messeinheiten sind anstelle der Photomultiplier mit Hydrophonen (Unterwasser-Mikrophone) ausgestattet. Mit diesen Hydrophonen sollen die Möglichkeiten der akustischen Nachweismethode untersucht werden. Der Name dieses Unterprojekts von ANTARES lautet AMADEUS (**A**ntares **M**odules for **A**coustic **D**etection **U**nder the **S**ea). AMADEUS ist zum Nachweis von hochenergetischen Neutrinos mit Energien von $E_\nu > 10^{18} \text{ eV}$ ausgelegt [2].

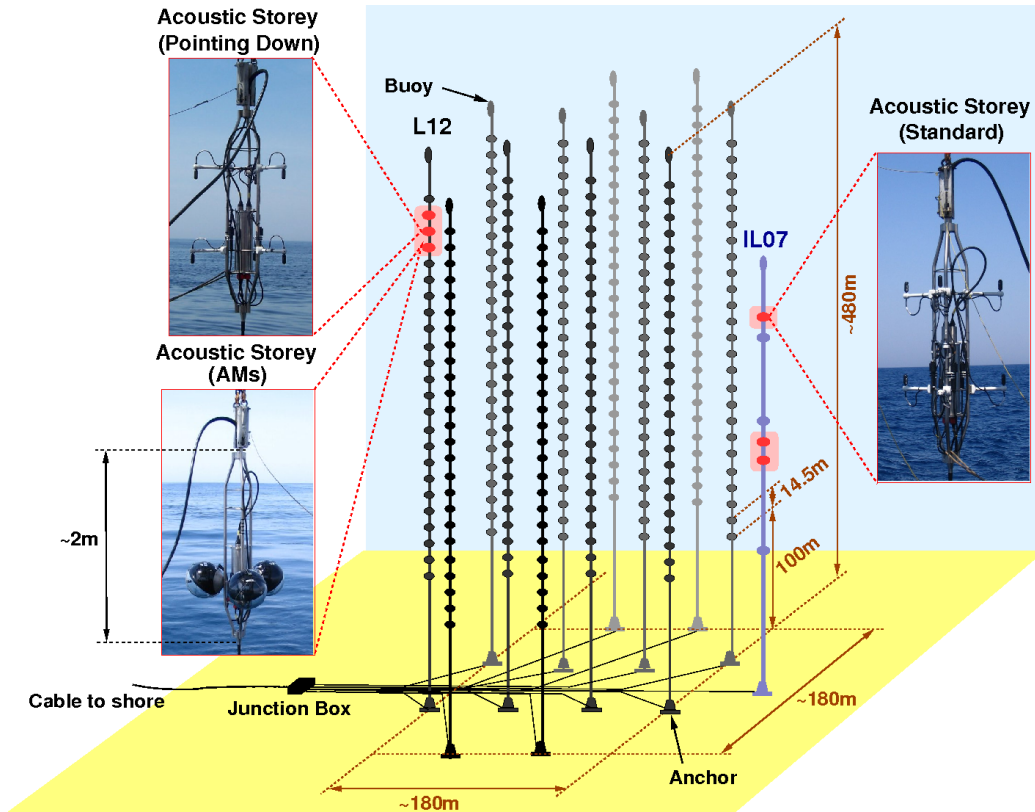


Abbildung 1: schematischer Aufbau von ANTARES bzw. AMADEUS, entnommen aus [11]

2.3 Akustische Neutrinoerkennung

Reaktionen zwischen Neutrinos und Materie können einerseits in die NC-Reaktionen (Neutral-Current-Reaktionen), bei denen die Reaktionspartner erhalten bleiben (siehe Abbildung (2)) und andererseits in die CC-Reaktionen (Charged-Current-Reaktionen), bei welchen das Neutrino in das Lepton der selben Generation umgewandelt wird (siehe Abbildung (3)), eingeteilt werden. Dabei gibt das Neutrino, sowohl bei NC-Reaktionen als auch bei CC-Reaktionen, im ultra-hochenergetischen Fall im Durchschnitt etwa 20 % seiner Energie an den Reaktionspartner ab [9]. Findet eine Neutrino-Materie-Reaktion im Wasser statt, wird die Energie der Spaltprodukte im Wasser deponiert. Dies gilt nicht für die verbleibende Energie des Neutrinos bei einer NC-Reaktion und die Energie des Myons bzw. Tauons bei einer CC-Reaktion, wodurch in diesen Fällen die im Wasser deponierte Energie deutlich geringer ist und die Reaktion somit wesentlich schwerer nachgewiesen werden kann.

Durch die Energie der Teilchenkaskade erwärmt sich das Wasser in einem zylinderförmigen Volumen mit einigen Zentimetern Radius und mehreren Metern Höhe [14].

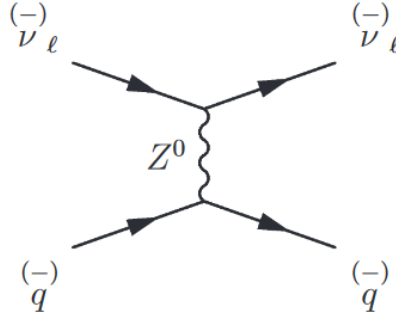


Abbildung 2: NC-Reaktion: Neutrino-Nukleon-Streuung, wobei ν_ℓ ein ℓ -Neutrino, q ein Quark, Z^0 ein Z-Boson und die gestrichenen Teilchen $\bar{\nu}_\ell$, \bar{q} das jeweilige Antiteilchen darstellen, entnommen aus [14]

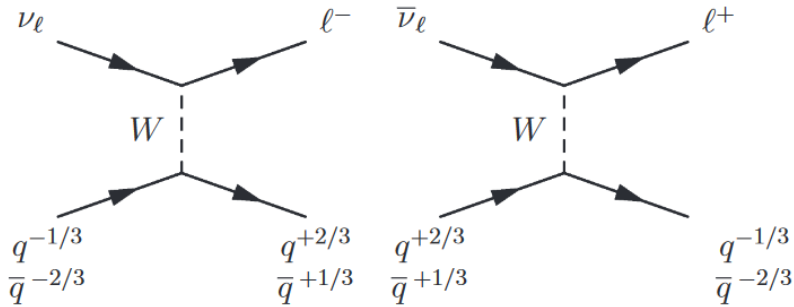


Abbildung 3: CC-Reaktionen: Neutrino-Nukleon-Streuung (links) und Antineutrino-Nukleon-Streuung (rechts), wobei ν_ℓ ein ℓ -Neutrino, ℓ^- das zum Neutrino passende Lepton, q^i ein Quark mit Ladung i , W ein W-Boson und die gestrichenen Teilchen $\bar{\nu}_\ell$, \bar{q} sowie ℓ^+ das jeweilige Antiteilchen darstellen, entnommen aus [14]

Dies führt zu einer thermischen Volumenänderung, was sich durch Ausdehnen des Wassers bemerkbar macht. Die Zeitskala, in der dieser Prozess abläuft, ist dabei wesentlich kleiner als die der hydrodynamischen Prozesse. Diese schnelle Ausdehnung des Wassers hat nach dem thermo-akustischen Modell eine Druckwelle zur Folge [10]. Die Form dieser Druckwelle ist in Abbildung (4) dargestellt. Der Druck bzw. Schall breitet sich in einer Scheibe senkrecht

zur Bewegungsrichtung des Neutrinos aus. Diese Scheibe wird auch Pancake genannt, wobei die hier schwarz eingezeichneten Linien die Isobaren, also die Flächen gleichen Drucks darstellen [4]. Außerdem ist die zeitliche Änderung des Druckes veranschaulicht. Sie hat die Form eines nicht symmetrischen, bipolaren Pulses.

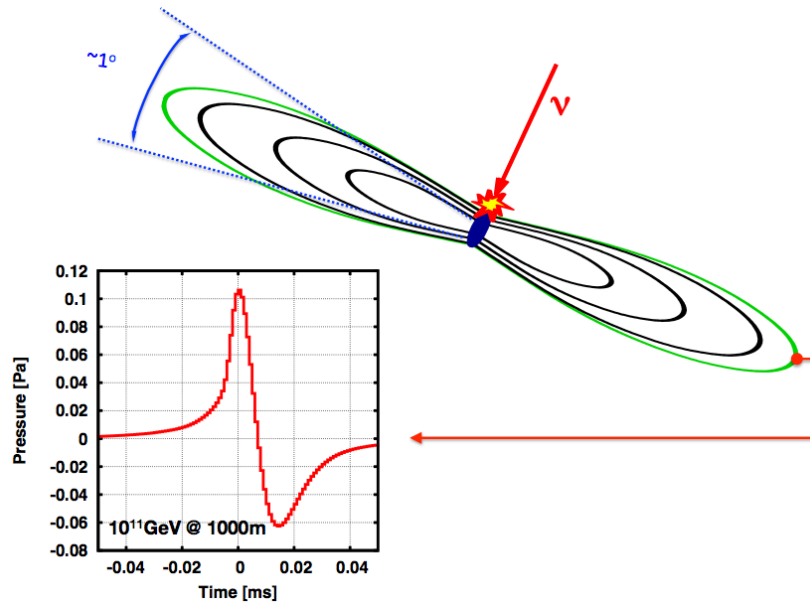


Abbildung 4: Schallscheibe nach Neutrino-Interaktion mit dem dazugehörigen akustischen Signal, entnommen aus [11]

Die Vorteile der akustischen Neutrino- Detektion gegenüber der optischen sind dabei zum einen, dass die Abschwächungslänge von Schall in Wasser um ein bis zwei Größenordnungen größer ist als die von Licht in Wasser. Dadurch kann bei gleicher Anzahl an Messeinheiten ein größeres Detektorvolumen ausgewertet werden. Zum anderen sind die akustischen Sensoren kompakter und die Ausleseelektronik einfacher [11].

3 Theoretische Grundlagen zur Signalverarbeitung

Zur Durchführung und Beurteilung der Filter sind einige mathematische Konzepte notwendig, die im Folgenden erläutert werden sollen.

3.1 Fouriertransformation

Durch die Fouriertransformation lässt sich ein zeitkontinuierliches Signal der Zeitdomäne in der Frequenzdomäne darstellen. Die Transformation erfolgt mit der Formel [15]

$$\mathcal{F}\{v(t)\} = V(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} v(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3.1)$$

Dieser Vorgang lässt sich durch die inverse Fouriertransformation umkehren. Diese ist wie folgt definiert [15].

$$\mathcal{F}^{-1}\{V(\omega)\} = v(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} V(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

Da Messwerte mit einer Abtastfrequenz f_{sample} gemessen werden, liegen sie nicht als kontinuierliches Signal, sondern als diskrete Werte vor. Dadurch lässt sich das Integral als Summe schreiben und man erhält als diskrete Fouriertransformierte eines Vektors \vec{v} die folgende Gleichung:

$$\mathcal{F}\{\vec{v}\}_n = V_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=0}^{N-1} v_k \cdot e^{-ikn/N} \quad (3.3)$$

Für einen reellen Vektor \vec{v} mit N Elementen im Zeitraum besitzt die diskrete Fouriertransformierte $N/2$ unabhängige, komplexwertige Einträge. Die anderen $N/2$ Elemente können durch komplexe Konjugation berechnet werden. Die Fouriertransformation wird üblicherweise als Betrag $|V(\omega)|$ und Phasenverschiebung $\phi = \tan^{-1} [\text{Im}(V(\omega))/\text{Re}(V(\omega))]$ dargestellt. Durch die Symmetrie der Fouriertransformierten reeller Funktionen ist eine einseitige Darstellung ($\omega \geq 0$) ausreichend.

3.2 Kreuzkorrelation

Um bei einem Eingangssignal $v(t) = n(t) + s(t)$, bestehend aus dem Rauschanteil $n(t)$ und dem gesuchten Signal $s(t)$, herauszufinden zu welchem Zeitpunkt

das Signal $s(t)$ gemessen wurde, besteht die Möglichkeit eine Kreuzkorrelation anzuwenden. Dabei muss das gesuchte Signal bekannt sein, denn dieses wird um τ gegenüber dem Eingangssignal verschoben und jeweils über das Produkt integriert. Somit entsteht eine Funktion $g(\tau)$, die wie folgt definiert ist [12]:

$$g(\tau) = \int s(t) \cdot v(t + \tau) \, dt \quad (3.4)$$

Nicht ganz so intuitiv, aber in der Anwendung einfacher zu realisieren, ist die Kreuzkorrelation im Frequenzraum. Diese hat außerdem den Vorteil, dass weniger Rechenschritte benötigt werden, wodurch der Filterprozess schneller vonstatten geht.

$$\mathcal{F}\{g(\tau)\} = G(\omega) = \mathcal{F}\{s(t)\}^* \cdot \mathcal{F}\{v(t)\} = S^*(\omega) \cdot V(\omega) \quad (3.5)$$

wobei $S^*(\omega)$ das komplex konjugierte zu $S(\omega)$ bezeichnet. Die Kreuzkorrelation ist also ein Filter, das an das gesuchte Signal, allerdings nicht an das vorhandene Rauschen angepasst ist.

3.3 Spektrale Leistungsdichte

Die spektrale Leistungsdichte (engl.: Power-Spectral-Density (PSD)) ist definiert als die Fouriertransformierte der Autokorrelationsfunktion. Die Autokorrelation ist die Kreuzkorrelation eines Signals mit sich selbst [12].

$$PSD(\omega) = \mathcal{F} \left\{ \int x(t) \cdot x(t + \tau) \, dt \right\} \quad (3.6)$$

Dies lässt sich umformen zu

$$PSD(\omega) = |\mathcal{F}\{x(t)\}|^2 \quad (3.7)$$

Das Integral der spektralen Leistungsdichte über alle Frequenzen ergibt die mittlere Signalleistung. Daher rührt auch die Bezeichnung spektrale Leistungsdichte, da das Produkt $PSD \cdot d\omega$ der im infinitesimalen Frequenzbereich $d\omega$ deponierten Leistung entspricht.

3.4 Matched Filter (Optimalfilter)

Eine „Erweiterung“ der Kreuzkorrelation ist das sogenannte Matched Filter. Dabei geht nicht nur das gesuchte Signal, sondern auch das vorhandene Rauschen mit in den Filterprozess ein. Die Idee ist es, die Frequenzbereiche im gesuchten Signal, die stark verrauscht sind (1 – 20 kHz in Abbildung (5)),

zu unterdrücken, indem durch die spektrale Leistungsdichte des Hintergrundrauschens dividiert wird. Bereiche, in denen die spektrale Leistungsdichte des Rauschens gering ist, werden somit stärker gewichtet.

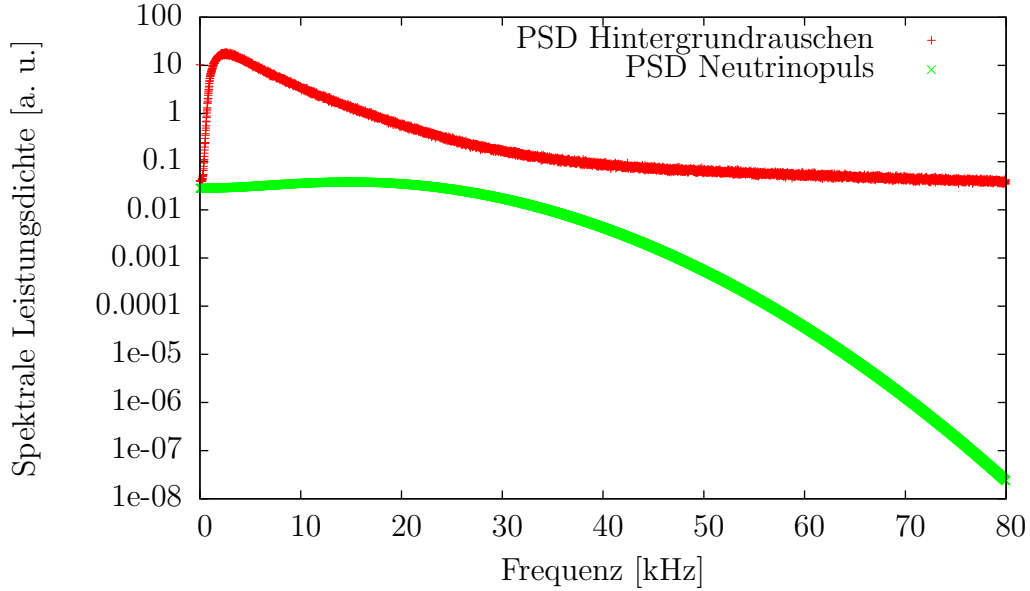


Abbildung 5: Leistungsdichtespektrum des Hintergrundrauschens und eines Neutrinopulses

Anzumerken ist hierbei, dass der Neutrinopuls aufgrund seiner begrenzten zeitlichen Auslenkung (siehe Abbildung (6)) ein Energiesignal ist. Ein Energiesignal ist ein Signal $x(t)$ endlicher Energie, wobei diese definiert ist als [18]:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt < \infty$$

Da Leistung Energie pro Zeit ist, wird die Leistung des Neutrinopulses mit größerem Zeitfenster immer kleiner. Im Gegensatz dazu ist das Rauschen ein Signal konstanter Leistung, weil die Energie mit zunehmendem Zeitfenster ebenfalls zunimmt. Daher sind in Abbildung (5) nur die Frequenzverläufe der spektralen Leistungsdichte von Bedeutung nicht die jeweiligen Höhen.

Die Fouriertransformierte des Matched Filters MF ist dabei definiert als [19]:

$$MF(\omega) = \frac{\mathcal{F}\{g(\tau)\}}{PSD_{noise}(\omega)} = \frac{\mathcal{F}\{s(t)\}^* \cdot \mathcal{F}\{v(t)\}}{PSD_{noise}(\omega)} = \frac{S^*(\omega) \cdot V(\omega)}{PSD_{noise}(\omega)} \quad (3.8)$$

Für weißes Rauschen entspricht das Matched Filter der Kreuzkorrelation, da die spektrale Leistungsdichte von weißem Rauschen konstant und somit nicht abhängig von ω ist.

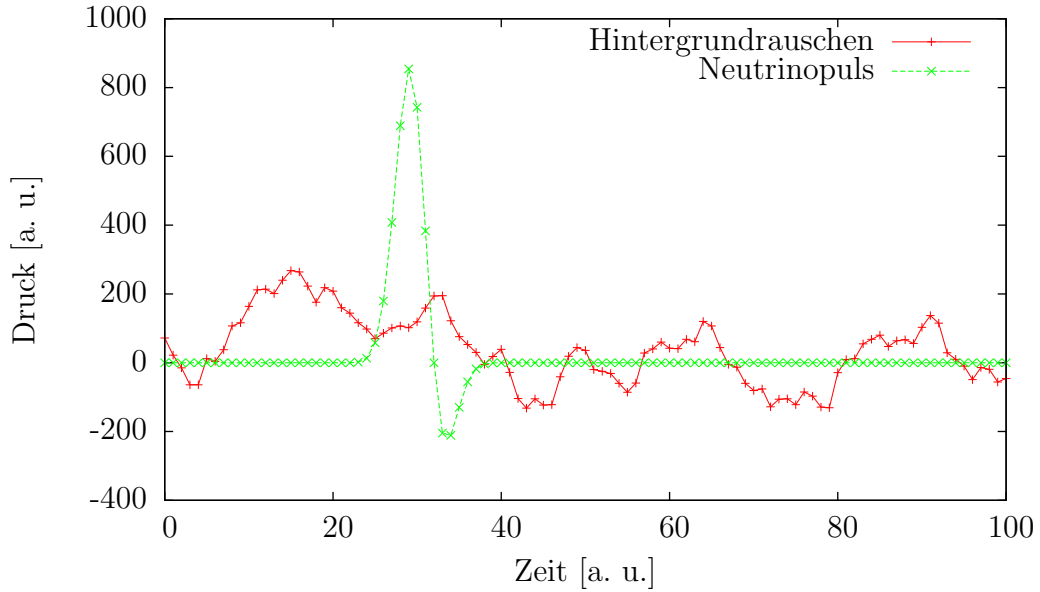


Abbildung 6: Hintergrundrauschen und Neutrinopuls in der Zeitdomäne

3.5 Signal-Rausch-Verhältnis

Das Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: Signal-Noise-Ratio (SNR)) gibt an, wie stark ein Signal sich von dem umliegenden Rauschen abhebt. Es ist im Rahmen dieser Arbeit definiert als:

$$SNR = \frac{A}{\sigma} = \frac{A}{\sqrt{E(x^2) - (E(x))^2}} \quad (3.9)$$

wobei A die Amplitude des Signals, σ die Standardabweichung des Rauschens, $E(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ den Erwartungswert und $E(x^2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$ das quadrierte quadratische Mittel bezeichnet. Damit die Form des biphasen Pulses (siehe Abbildung (6)) mit in die Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses SNR_{ungef} eingeht, wird bei diesem der Mittelwert aus dem positiven und negativen Ausschlag als Amplitude verwendet.

In Abbildung (7) sind zwei Neutrinopulse bei ca. 0.157 s und 0.18 s mit unterschiedlich starkem Hintergrundrauschen zu sehen. Da die Amplituden der beiden Signale in etwa gleich sind, resultieren daraus verschiedene Signal-Rausch-Verhältnisse. Für den linken Puls erhält man ein Signal-Rausch-Verhältnis von 7.33 und für den rechten von 2.51.

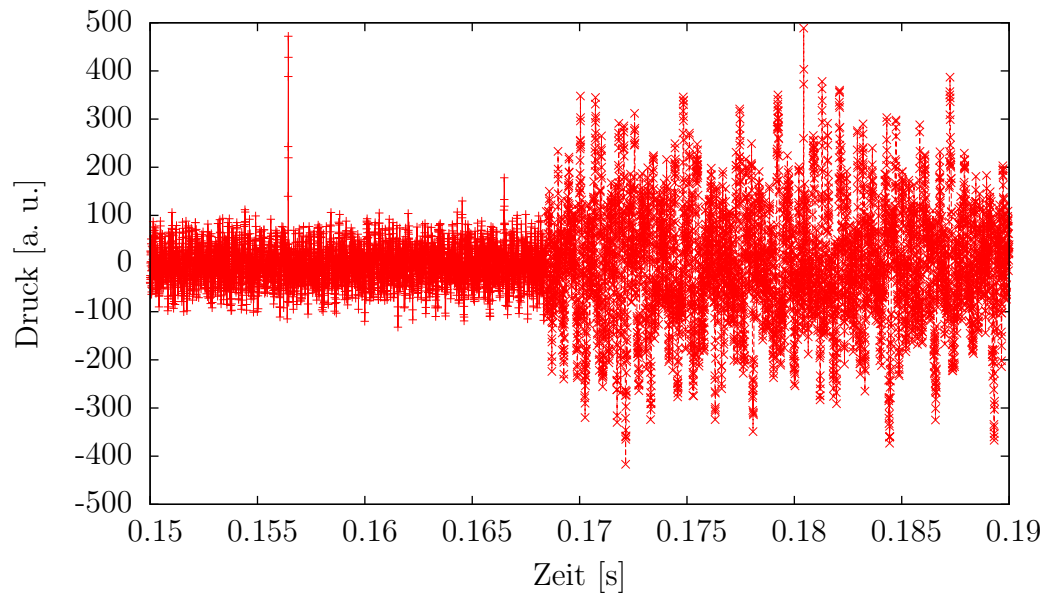


Abbildung 7: Neutrinopuls mit Hintergrundrauschen mit $SNR = 7.33$ links und $SNR = 2.51$ rechts

4 Simulationsstudien

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Filterqualität der Kreuzkorrelation und die des Matched Filters zu vergleichen, sowie einige weitere Effekte zu untersuchen. Dabei wird wie folgt vorgegangen.

Zur Simulation von Messdaten der verschiedenen Hydrophone wird auf eine Simulation zurückgegriffen, die mit Hilfe von SeaTray erstellt wurde. SeaTray ist ein Software Framework, das auf IceTray basiert und das für den ANTARES-Aufbau angepasst wurde [6, 16]. IceTray wurde ursprünglich für den Neutrinodetektor IceCube zur Detektorsimulation und Eventrekonstruktion erstellt [5].

Bei der verwendeten Simulation können diverse Parameter, wie beispielsweise die Energie des Neutrinos, die Stärke des Rauschens oder die Samplingrate variiert werden. Standardmäßig wird die Abtastrate analog zum AMADEUS-Detektor auf 250 kHz eingestellt.

4.1 Untersuchung des Matched Filters

Um ein Optimalfilter anwenden zu können, muss zunächst die spektrale Leistungsdichte des Rauschens berechnet werden. Zum Ausgleich vorkommender Schwankungen im Rauschen wird dieses 360 mal ohne Neutrinopuls für eine feste Einstellung simuliert und mit Formel (3.7) die spektrale Leistungsdichte berechnet. Die 360 Simulationen ergeben sich aus der Anzahl der Hydrophone (36) und der zehnfachen Durchführung der Simulation. Anschließend wird über diese gemittelt und das Ergebnis mit den bei der Simulation gewählten Einstellungen abgespeichert. Bei der Durchführung des Matched Filters wird immer die spektrale Leistungsdichte verwendet, die zuvor für die bei der Simulation gewählten Einstellungen berechnet wurde. Dadurch ergibt sich ein dynamisches Filter, das an die jeweils herrschenden Bedingungen angepasst ist.

Wie das Rauschen durch verschiedene Faktoren, wie beispielsweise die Windgeschwindigkeit, beeinflusst wird, ist in Abbildung (8) zu sehen. Die Simulation verschiedener Windgeschwindigkeiten mittels SeaTray zeigt, dass mit steigender Windgeschwindigkeit die auf das Wasser übertragene Leistung im Bereich von 0 – 40 kHz immer größer wird. Für Frequenzen größer als 40 kHz ändert sich die spektrale Leistungsdichte dagegen nicht. Das Rauschen sieht also mit steigender Windgeschwindigkeit immer weniger wie weißes Rauschen aus.

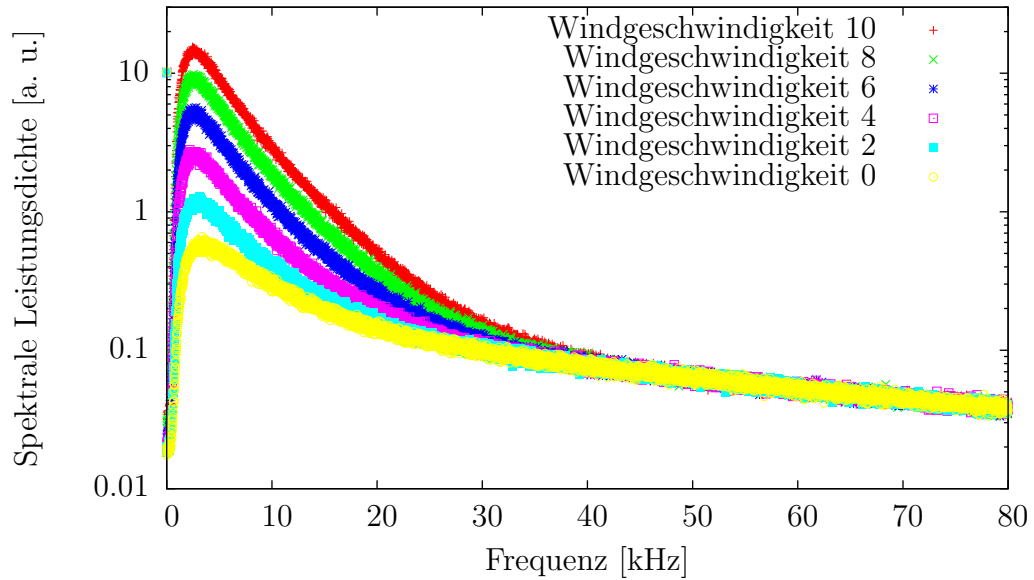


Abbildung 8: Simulierte Leistungsdichtespektren des Hintergrundrauschens für verschiedene Windgeschwindigkeiten in der Beaufortskala

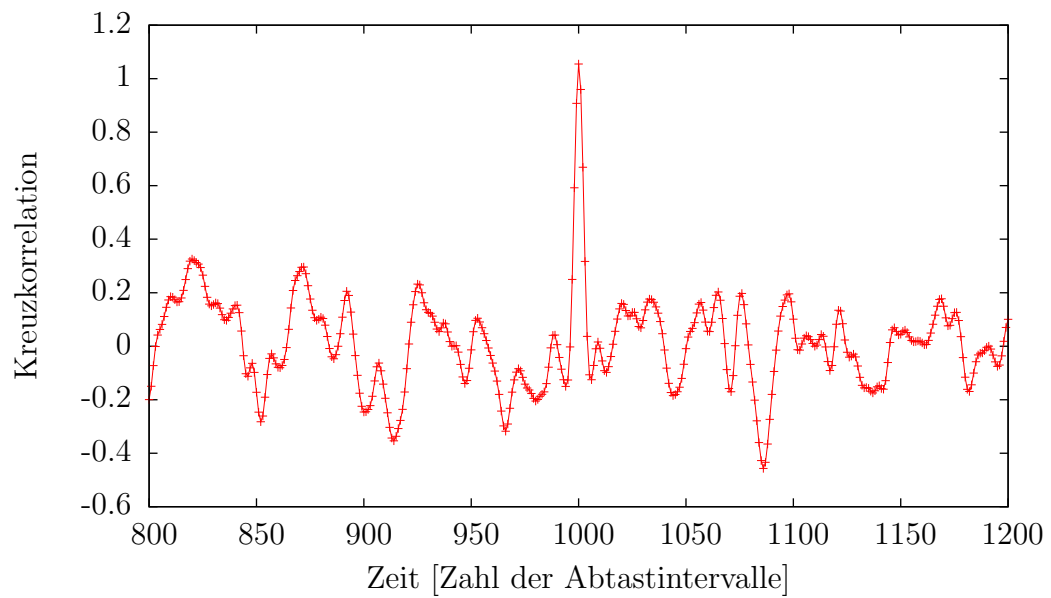


Abbildung 9: Ausgabe der Kreuzkorrelation für simuliertes Rauschen mit identischem hinzugefügtem Signal und Referenzsignal

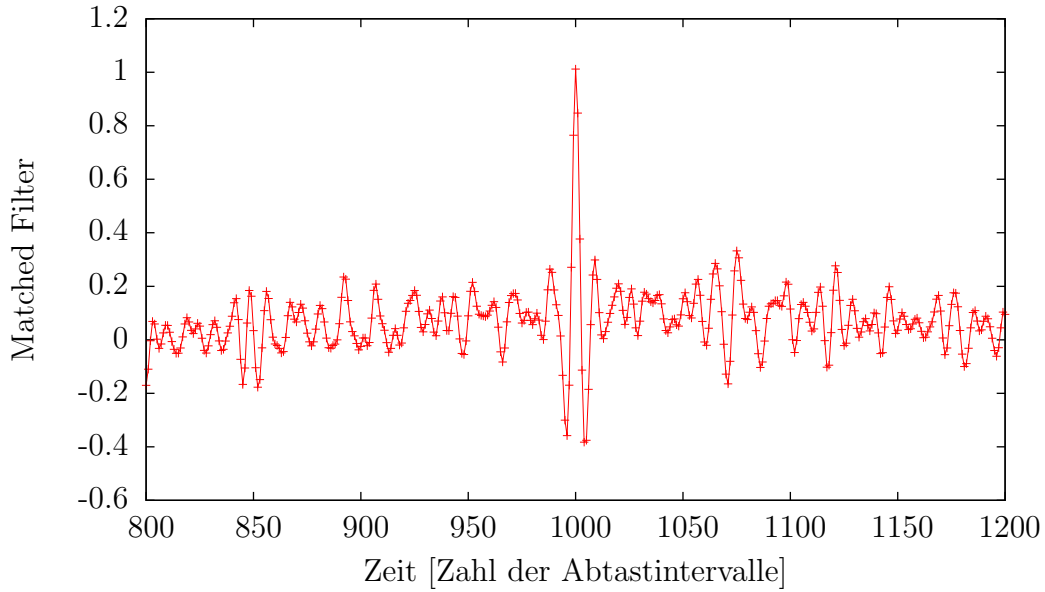


Abbildung 10: Ausgabe des Matched Filters für simuliertes Rauschen mit identischem hinzugefügten Signal und Referenzsignal

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wird zunächst manuell zu einem bekannten Zeitpunkt ein simulierter Neutrinopuls (Abbildung (4)) zu den simulierten Messwerten des Rauschens hinzugefügt. Dieses Signal ist das in der Realität für die Kreuzkorrelation implementierte Referenzsignal. Im Anschluss daran wird eine Kreuzkorrelation und ein Matched Filter angewendet, wobei als Referenzsignal dasselbe Signal verwendet wird, das auch in den simulierten Messwerten enthalten ist. Die dabei erhaltene Ausgaben sind in Abbildung (9) für die Kreuzkorrelation und in Abbildung (10) für das Matched Filter dargestellt. Sie sind dabei jeweils auf den Wert normiert, der sich bei einer Kreuzkorrelation bzw. einem Matched Filter des Referenzsignals mit sich selbst ergeben würde.

Außerdem wird das Signal-Rausch-Verhältnis des ungefilterten Signals, der Kreuzkorrelation und des Matched Filters berechnet. Dazu wird jeweils der Wert des Maximums des Pulses durch die jeweilige Standardabweichung σ_{ungef} , σ_{KK} oder σ_{MF} geteilt. Die Standardabweichung wurde dabei mit 6000 Messwerten, bei denen ausgeschlossen werden konnte, dass ein Neutrinopuls enthalten ist, wie in Formel (3.9) berechnet.

Diese Prozedur wurde für verschiedene Windgeschwindigkeiten, die sowohl Amplitude als auch Frequenzverteilung des Rauschens beeinflussen, mehrfach wiederholt. Die verschiedenen Signal-Rausch-Verhältnisse wurden für die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten getrennt in Histogramme eingetragen (siehe Abbildung (11) und (12)).

Um die Signal-Rausch-Verhältnisse besser vergleichen zu können, wurden deren Mittelwerte und Standardfehler in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit aufgetragen (siehe Abbildung (13)). Dabei ist zu sehen, dass sowohl das Matched Filter als auch die Kreuzkorrelation das Signal-Rausch-Verhältnis deutlich verbessern. Das Matched Filter bringt im Vergleich zur Kreuzkorrelation nochmal eine Verbesserung zwischen 23% und 175%. Diese ist dabei umso größer, je größer die Windgeschwindigkeit ist. Dies liegt daran, dass das Signal-Rausch-Verhältnis der Kreuzkorrelation im Vergleich zu dem des ungefilterten Signals und des Matched Filters deutlich schneller abfällt. Der Grund dafür wiederum ist, dass die Kreuzkorrelation, wie bereits in Kapitel (3.4) erwähnt, ein Matched Filter für weißes Rauschen darstellt. Bei Erhöhung der Windgeschwindigkeit ist das Rauschen einem weißen Rauschen immer unähnlicher (siehe Abbildung (8)), weshalb die Kreuzkorrelation für größere Windgeschwindigkeiten nicht so gute Ergebnisse liefert wie das Matched Filter, das an das gegenwärtige Rauschen angepasst ist.

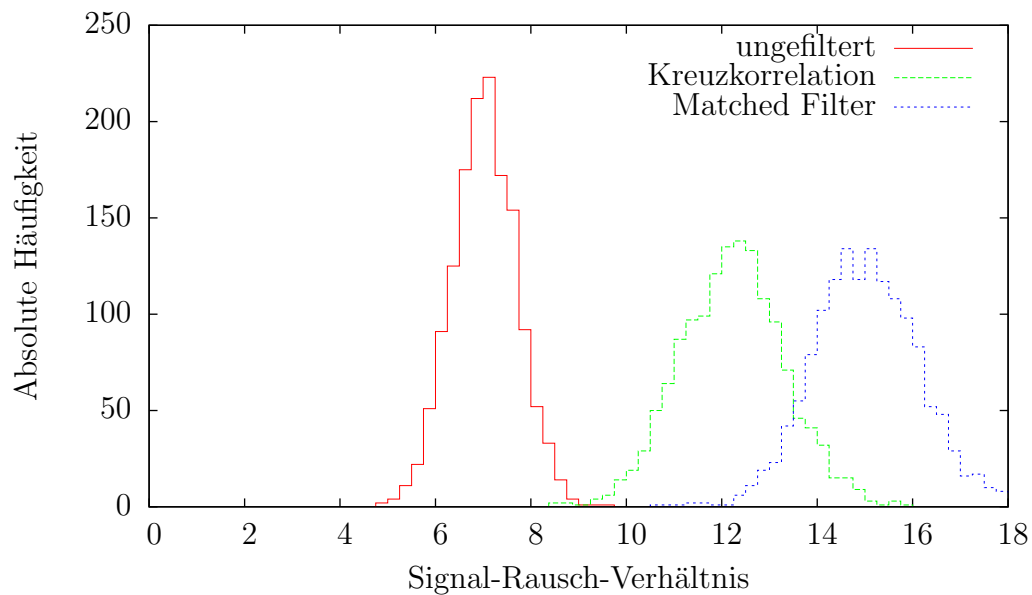


Abbildung 11: Histogramm zum Signal-Rausch-Verhältnis bei Windgeschwindigkeit 0

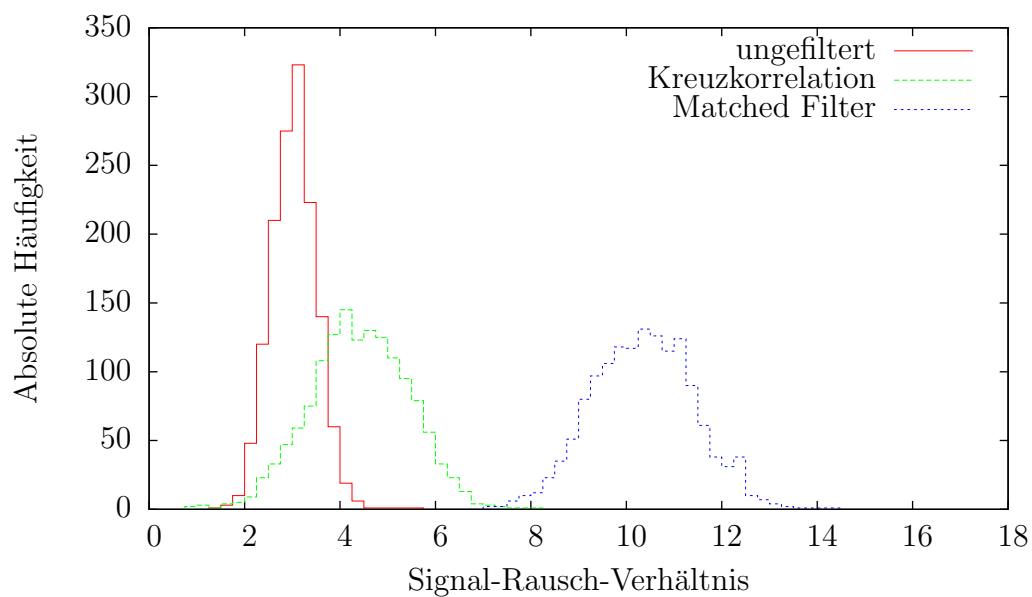


Abbildung 12: Histogramm zum Signal-Rausch-Verhältnis bei Windgeschwindigkeit 8

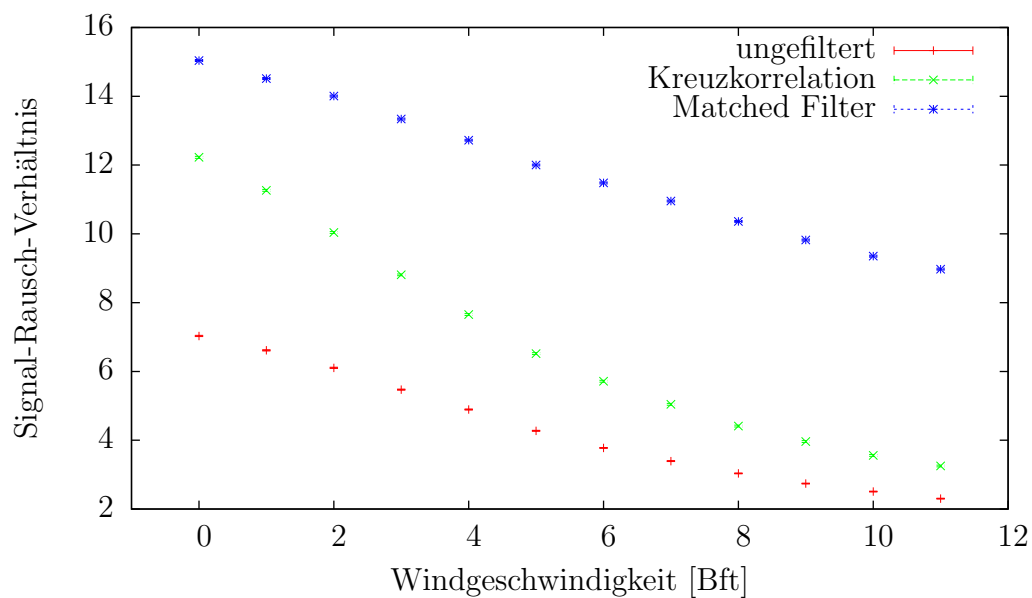


Abbildung 13: Signal-Rausch-Verhältnis für verschiedene Windgeschwindigkeiten in der Beaufortskala

4.2 Winkelabhängigkeit des Pulses und Antwort der Elektronik

Im vorhergehenden Kapitel wurde ein simulierter Puls manuell in das Rauschen hinzugefügt. Dieser gibt die Änderung des Druckes mit der Zeit korrekt wieder, allerdings wird in der Realität die Signalform durch die Messelektronik verfälscht. Ob dies einen Einfluss auf die Arbeit der Filter hat, soll im Folgenden untersucht werden.

Wie bereits in früheren Arbeiten beschrieben wurde (siehe [13]), ist sowohl die Form als auch die Amplitude des Neutrinopulses stark abhängig von dem Winkel, unter dem dieser aufgezeichnet wird. Da der implementierte Puls auf Höhe des Schauermaximums simuliert wurde, muss dieses zunächst reproduziert werden. Zu diesem Zweck wurde der Neutrinointeraktionspunkt auf Höhe eines Hydrophons in 200 m horizontaler Entfernung von diesem festgelegt. Dann wurde die Position des Hydrophons parallel zur Schauerachse immer weiter nach unten gelegt, wodurch das Hydrophon einmal durch den Pancake wandert. Dieses Vorgehen ist in Abbildung (14) veranschaulicht. In Abbildung (15) ist die Abhängigkeit der Amplitude des Neutrinopulses von der Position des Hydrophons aufgetragen.

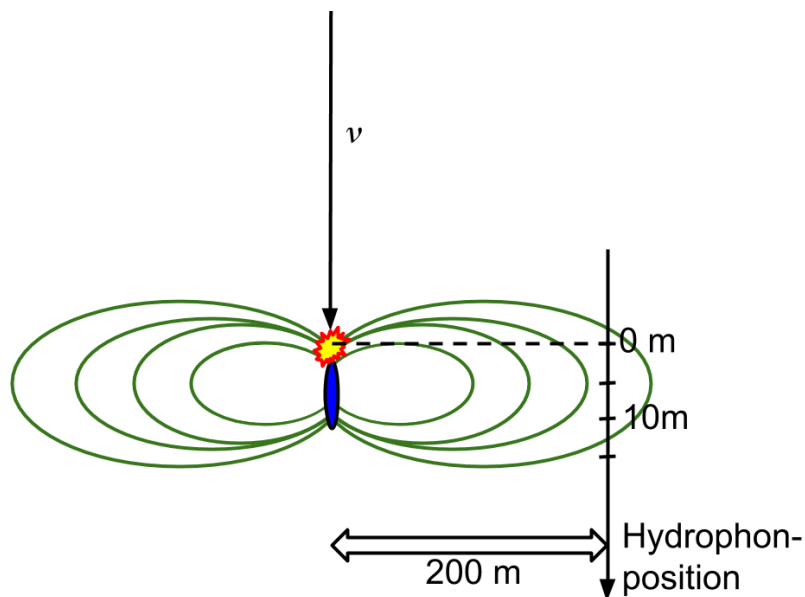


Abbildung 14: Skizze des Vorgehens (nicht maßstabsgetreu)

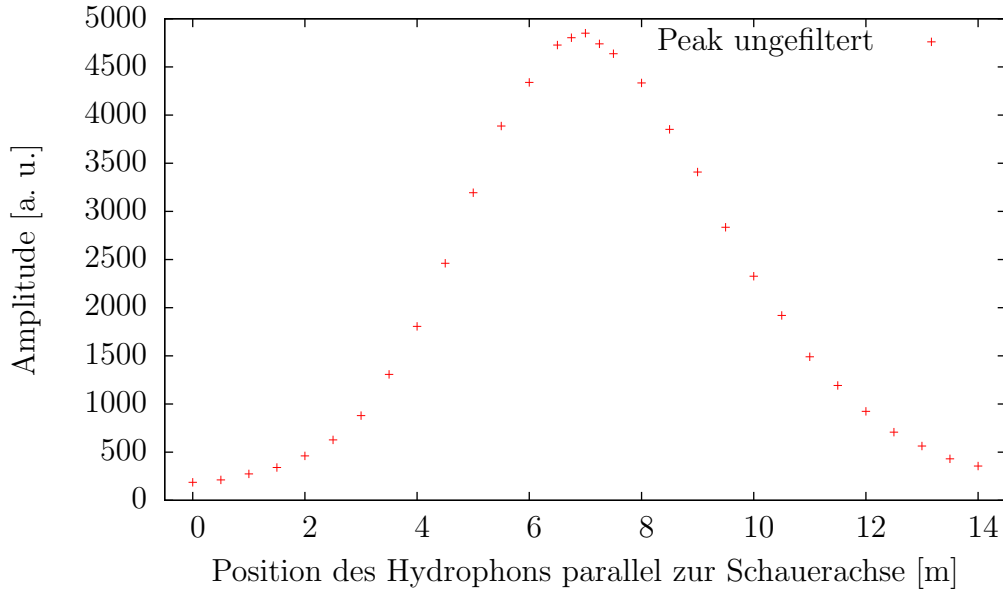


Abbildung 15: Abhängigkeit der Amplitude des ungefilterten Signals von der Distanz des Detektors unter dem Neutrinointeraktionspunkt

verwendetes Referenzsignal	ungefiltert	Kreuzkorrelation	Matched Filter
implementiertes Signal	12.55 ± 0.16	9.92 ± 0.29	15.26 ± 0.20
Signal aus Simulation	12.68 ± 0.20	23.08 ± 0.30	27.03 ± 0.30

Tabelle 1: Signal-Rausch-Verhältnisse für verschiedene Referenzsignale und Filter

Anschließend wurde am Ort maximaler Amplitude mehrmals ein Neutrinopuls simuliert und über die verschiedenen Messungen gemittelt, um das Hintergrundrauschen zu entfernen. Um reproduzierbare Pulse zu erreichen, wurde die Simulation so angepasst, dass immer die gesamte Energie des Neutrinos im Schauer deponiert wird, was normalerweise ein zufälliger Prozess ist (siehe Kapitel (2.3)). Das dabei erhaltene Signal ist zusammen mit dem implementierten Signal in Abbildung (16) dargestellt.

Nun wird einerseits das implementierte Signal und andererseits das gemittelte Signal aus der Simulation als Referenzsignal verwendet, um eine Kreuzkorrelation bzw. das Matched Filter anzuwenden. Der simulierte Neutrinopuls hat bis auf statistische Schwankungen durch das in der Simulation addierte Rauschen die Form des roten Pulses aus Abbildung (16). Dabei wird wiederum das Signal-Rausch-Verhältnis zur Bewertung der Filter über mehrere Simulationen gemittelt. Die dabei erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle (1) zusammengefasst.

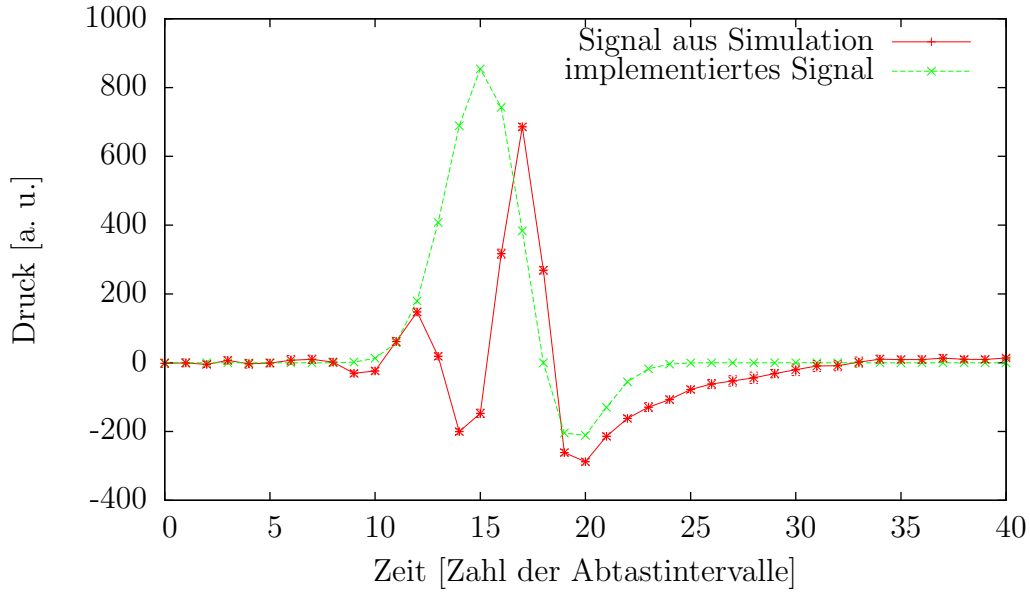


Abbildung 16: In Kreuzkorrelation implementiertes Signal und mit Antwort der Elektronik simuliertes Signal

Die Signal-Rausch-Verhältnisse der ungefilterten Signale sind identisch, da das ungefilterte Signal nicht von der Wahl des Referenzsignals abhängt. Wie zu erwarten, ist das Signal-Rausch-Verhältnis der Kreuzkorrelation mit dem simulierten gemittelten Signal besser als mit dem implementierten. Der Unterschied ist mit 2.5 mal höherem Signal-Rausch-Verhältnis bei dem simulierten gemittelten Referenzsignal groß. Es fällt auf, dass die Kreuzkorrelation zwischen dem simulierten und dem implementierten Signal sogar ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis aufweist als das ungefilterte Signal. Dies kann man sich dadurch erklären, dass die diskrete Kreuzkorrelation definiert ist als

$$g_j = \sum_{i=1}^N s_i \cdot v_{i+j}$$

wobei bei der Kreuzkorrelation zwischen den beiden verschiedenen Signalen auch bei maximaler Kreuzkorrelation Messwerte teilweise verschiedene Vorzeichen haben. Dies führt dann zu einem negativen Summand, weshalb die Kreuzkorrelation eine kleinere maximale Amplitude hat, was wiederum zu einem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis führt. Dies ist besonders hervorzuheben, da das implementierte Signal das Signal ist, welches im AMADEUS-Filter verwendet wird.

Nach den vorhergehenden Untersuchungen überrascht es nicht, dass das Matched Filter jeweils zu einem noch besseren Signal-Rausch-Verhältnis führt.

Allerdings kann es die Schwäche der Kreuzkorrelation der verschiedenen Signale gut kompensieren, obwohl das Matched Filter aus der Kreuzkorrelation gebildet wird.

4.3 Digitalisierungseffekte

Die kontinuierlichen Messwerte der Hydrophone werden bei der Digitalisierung mit der Samplingrate $f_{sample} = 250$ kHz abgetastet. Dabei ist die Lage der Abtastzeitpunkte relativ zum gesuchten Signal zufällig, wodurch selbst bei übereinstimmenden kontinuierlichen Signalen, die digitalisierten Werte im Allgemeinen voneinander abweichen. Die Signalform wird also durch die Digitalisierung verfälscht. Im Folgenden soll untersucht werden, ob die unterschiedliche Abtastung von Referenzsignal und gesuchten Signal einen signifikanten Effekt auf das Signal-Rausch-Verhältnis der verschiedenen Filter hat.

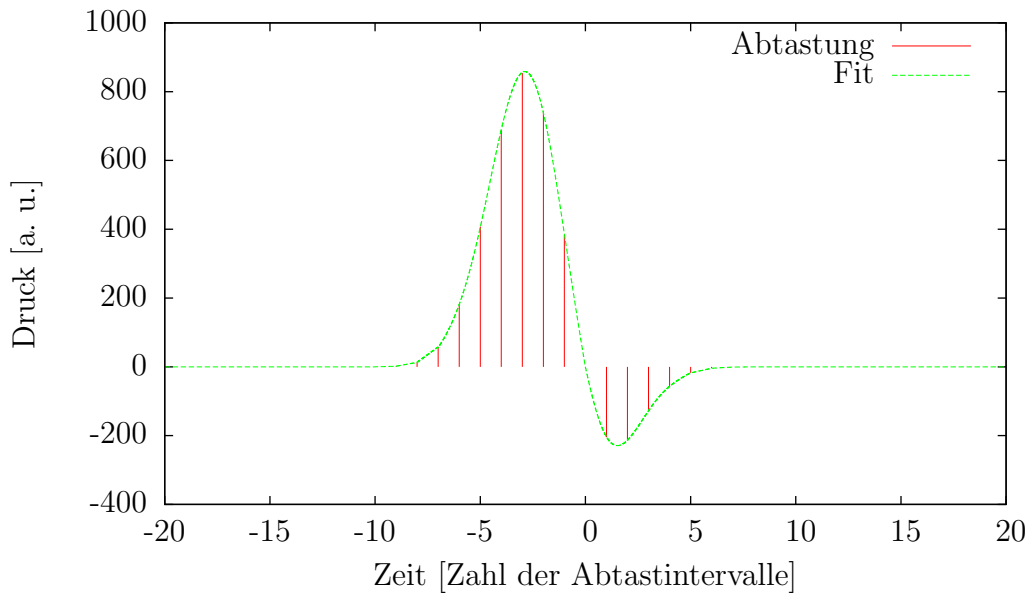


Abbildung 17: Fitfunktion durch simulierten Neutrinopuls mit möglicher Abtastung

Dafür wurden zunächst mehrere Funktionen durch den implementierten Puls gefittet (siehe Abbildung (17) und Tabelle (2) im Anhang). In den Randbereichen wurden lineare Funktionen an die Werte gefittet und im Bereich von -5 bis 0 sowie von 0 bis 5 wurden höhergradige Polynome verwendet. Mit dieser gefitteten Gesamtfunktion war es nun möglich, eine Abtastung $f(x_{i,0})$

zu berechnen. Anschließend wurden weitere Abtastungen berechnet, wobei für die n -te Abtastung mit $n = 0, \dots, 19$ gilt

$$f(x_{i,n}) = f\left(x_{i,0} + \frac{n}{20}\right)$$

Die Abtastpunkte wurden also immer um $\frac{1}{20}$ des Abtast-Intervalls verschoben bis wieder die ursprüngliche Abtastung erreicht wurde. Diese verschiedenen Abtastungen wurden wieder zu dem Hintergrundrauschen manuell hinzugefügt, wobei die verschiedenen Signale gleich häufig verwendet wurden, was einer zufälligen Abtastung bei der Digitalisierung gleichkommt.

Als Referenzsignal wurde dabei immer das Signal ohne Verschiebung verwendet. Anschließend wurde die Windgeschwindigkeit und damit das Rauschen variiert. Die dabei erhaltenen Werte sind zusammen mit denen aus Kapitel (4.1), bei denen die Abtastung von Referenzsignal und hinzugefügtem Puls identisch ist, in Abbildung (18) in Abhängigkeit von der Windstärke aufgetragen.

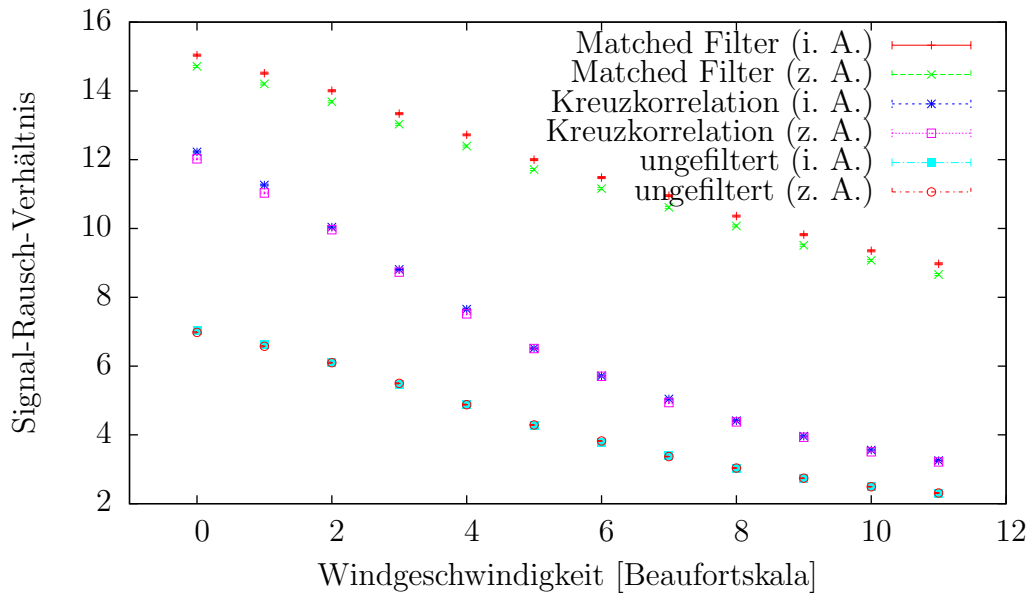


Abbildung 18: Vergleich des Signal-Rausch-Verhältnisses von Pulsen mit identischer Abtastung (i. A.) und Pulsen mit zufälliger Abtastung (z. A.)

Dabei ist zu sehen, dass für das ungefilterte Signal das Signal-Rausch-Verhältnis unverändert bleibt. Ein möglicher Grund dafür wäre, dass der Digitalisierungseffekt sich teilweise aufhebt, da zur Ermittlung der Amplitude der Mittelwert aus Maximum und dem Betrag des Minimums verwendet wird. Verschiebt man nun die Abtastung, wird zwar der maximale Messwert kleiner

dafür allerdings der Betrag des minimalen Wertes größer, wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis unverändert bleibt. Dies ist allerdings nicht der Grund, denn dieselbe Messung wurde nochmal durchgeführt, wobei dabei nur das Maximum zur Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses des ungefilterten Signals verwendet wurde. Auch hierbei folgte durch die zufällige Abtastung im Vergleich zur perfekten Abtastung nur eine Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses um $(0.6 \pm 0.7)\%$.

Dieses Ergebnis lässt sich reproduzieren, indem die Maxima der verschobenen Signale gemittelt werden und durch das Maximum des unverschobenen Signals dividiert wird. Dabei erhält man eine Verkleinerung des durchschnittlichen Maximums um $(1.0 \pm 1.4)\%$. Da das Rauschen bis auf statistische Schwankungen konstant bleibt, entspricht dies der Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Auch für die Kreuzkorrelation ändert sich das Signal-Rausch-Verhältnis nicht. Einzig für das Matched Filter verschlechtert sich das Signal-Rausch-Verhältnis um $(2.6 \pm 0.4)\%$.

Die zufällige Abtastung des Signals bei der Digitalisierung führt also nur zu vernachlässigbar kleinen Effekten. Dies zeigt, dass die Samplingrate für die Signalform des Neutrinopulses groß genug gewählt ist, um das Signal aufzunehmen und um eine Kreuzkorrelation bzw. ein Matched Filter anzuwenden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend lässt sich sagen, dass das Matched Filter im Vergleich zur Kreuzkorrelation eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses zur Folge hat. Die Verbesserung ist dabei umso größer, je schlechter das Signal-Rausch-Verhältnis des ungefilterten Signals ist. Des weiteren wurde festgestellt, dass bei der verwendeten Samplingrate von 250 kHz bei einer Verschiebung der Abtastzeitpunkte des Signals nur eine vernachlässigbar kleine Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses auftritt. Außerdem wurde gezeigt, dass die Antwort der Elektronik einen deutlichen Einfluss auf die Signalform hat. Dies führt zu einer Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses bei der Kreuzkorrelation mit dem implementierten Signal im Vergleich zum ungefilterten Signal.

Da die Pulsform stark winkelabhängig ist [13], wäre es sinnvoll, eine Filterbank zu erstellen. Dabei wird nicht nur ein Signal als Referenzsignal implementiert, sondern mehrere für verschiedene Winkel. Dadurch kann die jeweilige Triggerschwelle der Kreuzkorrelation bzw. des Matched Filters deutlich erhöht werden. Die Verwendung einer solchen Filterbank verbessert die Reinheit des Filters, da durch die erhöhte Triggerschwelle weniger Hintergrundsignale getriggert werden. Außerdem kann dabei, durch die Kenntnis mit welchem Referenzsignal die Kreuzkorrelation das beste Ergebnis liefert, der Interaktionspunkt des Neutrinos rekonstruiert werden. Die Position der Neutrinointeraktion kann allerdings nur bestimmt werden, wenn dafür die Messergebnisse mehrerer Hydrophone verwendet werden.

Um das Ergebnis der Filterbank zu optimieren wäre es nötig, den Einfluss der Messelektronik auf die Signalform zu beachten. Daher sollte bei der Wahl der Referenzsignale dieser Effekt berücksichtigt werden. Eine Änderung des Referenzsignals wäre auch für das derzeit verwendete Kreuzkorrelationsfilter sinnvoll, um neutrinoartige Signale effizienter triggern zu können.

Anhang

Bereich	Fitfunktion	Konstanten
-32 bis -10	$a * x + b$	$a = -0.0008 \pm 0.0004; b = -0.021 \pm 0.009$
-10 bis -9	$a * x + b$	$a = 1.762; b = 17.62$
-9 bis -8	$a * x + b$	$a = 11.3442; b = 103.86$
-8 bis -7	$a * x + b$	$a = 44.8002; b = 371.508$
-7 bis 0	$\sum_{i=0}^9 c_i \cdot x^i$	$c_0 = -1 \pm 4; c_1 = -365 \pm 7; c_2 = 15 \pm 6;$ $c_3 = -24 \pm 6; c_4 = -14.9 \pm 1.4; c_5 3.8 = \pm 0.9;$ $c_6 = 2.6 \pm 0.4; c_7 = 0.48 \pm 0.08; c_8 = 0.038 \pm$ $0.006; c_9 = 0.00011 \pm 0.00019$
0 bis 5	$\sum_{i=0}^6 c_i \cdot x^i$	$c_0 = 0 \pm 4; c_1 = -280 \pm 7; c_2 = 30.9 \pm 2.8;$ $c_3 = 71 \pm 6; c_4 = -29.7 \pm 2.7; c_5 = 4.5 \pm 0.6;$ $c_6 = -0.24 \pm 0.04$
5 bis 6	$a * x + b$	$a = 13.4939; b = -85.0987$
6 bis 7	$a * x + b$	$a = 3.4231; b = -24.6739$
7 bis 8	$a * x + b$	$a = 0.626201; b = -5.09561$
8 bis 31	$a * x + b$	$a = 0.0009 \pm 0.0005; b = -0.022 \pm 0.011$

Tabelle 2: Bereiche des in der Arbeit verwendeten bipolaren Signals mit der jeweiligen Fitfunktion. Die Bereiche beziehen sich auf die Abtastpunkte.

Abbildungsverzeichnis

1	schematischer Aufbau von ANTARES bzw. AMADEUS, entnommen aus [11]	3
2	NC-Reaktion: Neutrino-Nukleon-Streuung, wobei ν_ℓ ein ℓ -Neutrino, q ein Quark, Z^0 ein Z-Boson und die gestrichenen Teilchen $\bar{\nu}_\ell$, \bar{q} das jeweilige Antiteilchen darstellen, entnommen aus [14]	4
3	CC-Reaktionen: Neutrino-Nukleon-Streuung (links) und Antineutrino-Nukleon-Streuung (rechts), wobei ν_ℓ ein ℓ -Neutrino, ℓ^- das zum Neutrino passende Lepton, q^i ein Quark mit Ladung i , W ein W-Boson und die gestrichenen Teilchen $\bar{\nu}_\ell$, \bar{q} sowie ℓ^+ das jeweilige Antiteilchen darstellen, entnommen aus [14]	4
4	Schallscheibe nach Neutrinointeraktion mit dem dazugehörigen akustischen Signal, entnommen aus [11]	5
5	Leistungsdichtespektrum des Hintergrundrauschens und eines Neutrinopulses	8
6	Hintergrundrauschen und Neutrinopuls in der Zeitdomäne	9
7	Neutrinopuls mit Hintergrundrauschen mit $SNR = 7.33$ links und $SNR = 2.51$ rechts	10
8	Simulierte Leistungsdichtespektren des Hintergrundrauschens für verschiedene Windgeschwindigkeiten in der Beaufortskala	12
9	Ausgabe der Kreuzkorrelation für simuliertes Rauschen mit identischem hinzugefügten Signal und Referenzsignal	12
10	Ausgabe des Matched Filters für simuliertes Rauschen mit identischem hinzugefügten Signal und Referenzsignal	13
11	Histogramm zum Signal-Rausch-Verhältnis bei Windgeschwindigkeit 0	14
12	Histogramm zum Signal-Rausch-Verhältnis bei Windgeschwindigkeit 8	15
13	Signal-Rausch-Verhältnis für verschiedene Windgeschwindigkeiten in der Beaufortskala	15
14	Skizze des Vorgehens (nicht maßstabsgetreu)	16
15	Abhängigkeit der Amplitude des ungefilterten Signals von der Distanz des Detektors unter dem Neutrinointeraktionspunkt	17
16	In Kreuzkorrelation implementiertes Signal und mit Antwort der Elektronik simuliertes Signal	18
17	Fitfunktion durch simulierten Neutrinopuls mit möglicher Abtastung	19
18	Vergleich des Signal-Rausch-Verhältnisses von Pulsen mit identischer Abtastung (i. A.) und Pulsen mit zufälliger Abtastung (z. A.)	20

Literatur

- [1] M. Ageron et al. (ANTARES Coll.), ANTARES: the first undersea neutrino telescope, arXiv:1104.1607v1 [astro-ph.IM], 2011
- [2] J.A. Aguilar et al. (ANTARES Coll.), AMADEUS – The Acoustic Neutrino Detection Test System of the ANTARES Deep-Sea Neutrino Telescope, Nucl. Inst. and Meth. A 626-627 (2011) 128, arXiv:1009.4179v2 [astro-ph.IM], 2011
- [3] G. Anton, <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/kosmische-%20neutrinos/tiefsee-neutrinodeleskope/>, 2007, Stand: 13.7.2016
- [4] S. Brehm, Studien zur Positionsbestimmung der akustischen ANTARES-Stockwerke, Diplomarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (2009, ECAP-2008-022)
- [5] T. DeYoung, IceTray: A Software Framework for IceCube, International Conference on Computing in High-Energy Physics and Nuclear Physics (CHEP2004), 2004
- [6] T.Eberl, The SeaTray Software Framework, KM3NeT Collaboration Meeting, Marseille, 2013
- [7] S. Funk, Skript zur Experimentalphysik 5, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (WS 2015/16)
- [8] R. Gandhi, C. Quigg, M. Hall Reno und I. Sarcevic, Neutrino interactions at ultrahigh energies, Physical Review D, 58:093009, 1998
- [9] R. Gandhi, C. Quigg, M. Hall Reno und I. Sarcevic, Ultrahigh-Energy Neutrino Interactions, Astropart. Phys. 5 (1996) 81, arXiv:hep-ph/9512364v1
- [10] K. Graf, Teststrahlungsmessungen zur akustischen Neutrinodetektion: Thermoakustische Schallerzeugung in Wasser, Diplomarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (2004, FAU-PI1-DIPL-04-002)
- [11] Homepage der Akustikgruppe am ECAP, <http://www.ecap.nat.uni-erlangen.de/acoustics/>, Stand: 11.7.2016

- [12] M. Hufschmid, Information und Kommunikation - Grundlagen und Verfahren der Informationsübertragung, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, (2006)
- [13] D. Kiessling, Ambient noise in the Ligurian Sea as background to acoustic particle detection, Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (2013, ECAP-2013-041)
- [14] R. Lahmann, Ultra-High-Energy Neutrinos and Their Acoustic Detection in the Sea, Habilitation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (2011)
- [15] C. B. Lang und N. Pucker, Mathematische Methoden in der Physik, Springer Akademischer Verlag, Berlin Heidelberg, (2016)
- [16] M. Neff, Studies on the Selection of Neutrino-like Signals for the Acoustic Detection Test Device AMADEUS, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (2013, ECAP-2013-023)
- [17] F. Schneider, Anwendung und Analyse von Korrelationsfiltermethoden im Rahmen des AMADEUS-Experiments, Diplomarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (2010, ECAP-2010-013)
- [18] H. Schneider-Obermann, Basiswissen der Elektro-, Digital-, und Informationstechnik, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, (2006)
- [19] G. Turin, An introduction to matched filters, IRE Transactions on Information Theory, 6(3):311-329, (1960)

Erklärung

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

Erlangen, den 21. Juli 2016

Johannes Link