

# Untersuchungen der Zeitverzögerung akustischer Sensoren zur Positionskalibrierung des Neutrinoobservatoriums KM3NeT

Bachelorarbeit aus der Physik

Vorgelegt von  
**Andreas Zmija**  
09.09.2015

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



Betreuer: PD Dr. Robert Lahmann

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2 Der Detektionsprozess</b>	<b>5</b>
2.1 Wechselwirkungen des Neutrinos . . . . .	5
2.2 Cherenkov-Strahlung . . . . .	5
2.3 Nachweis akustischer Signale im Wasser . . . . .	6
2.3.1 Das Piezo-Element . . . . .	6
2.3.2 Signalverarbeitung im Octopus-board . . . . .	6
<b>3 Versuchsaufbau</b>	<b>7</b>
3.1 Erzeugen und Aufnehmen eines Tonsignals . . . . .	7
3.2 Festhalten des Signalzeitpunktes . . . . .	8
3.3 Vergleichbarkeit - Zwei Kanäle im Aufnahmeprogramm . . . . .	11
3.4 Ein eigenes Programm zur Datenanalyse . . . . .	12
<b>4 Analysevorgang der Signale</b>	<b>13</b>
4.1 Erste Einblicke und erste Probleme . . . . .	13
4.2 Überschreiten einer Schwelle . . . . .	14
4.3 Eine ausreichend starke Signalsteigung . . . . .	15
4.4 Gute Signale sind stark . . . . .	16
4.5 Periodische Peaks . . . . .	16
4.5.1 Ein Störgeräusch . . . . .	16
4.5.2 Peakvorhersage und Peakkriterium . . . . .	19
4.5.3 Weitere Peakprobleme . . . . .	20
4.6 Die Einhüllende - Eine Vergleichsmethode . . . . .	20
4.6.1 Das Prinzip eines FIR-Filters . . . . .	20
4.6.2 Bilden einer Einhüllenden . . . . .	21
4.6.3 Zeitverzögerung im Filter . . . . .	21
4.6.4 Tiefpass-Filter . . . . .	21
4.6.5 Auslösemethodik . . . . .	22
4.7 Einstellung der Triggerschwellen . . . . .	23
<b>5 Versuchsdurchführung</b>	<b>24</b>
5.1 Ablesefehler . . . . .	24
<b>6 Messergebnisse</b>	<b>25</b>
6.1 Ergebnisse der drei Abstandsmessungen . . . . .	25
6.1.1 Diskussion der Ergebnisse der $\sigma$ -Methode . . . . .	28
6.1.2 Diskussion der Ergebnisse der FIR-Methode . . . . .	28
6.2 Die Schallgeschwindigkeit . . . . .	28
6.3 Ergebnisse für die Zeitverzögerung . . . . .	30
6.4 Wo ist der tatsächliche Signalanfang? . . . . .	33
6.5 Welche Methode ist besser? . . . . .	34
6.6 Quantitativer Überblick der Messergebnisse . . . . .	35
<b>7 Ausblick</b>	<b>36</b>

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>37</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>38</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>39</b>

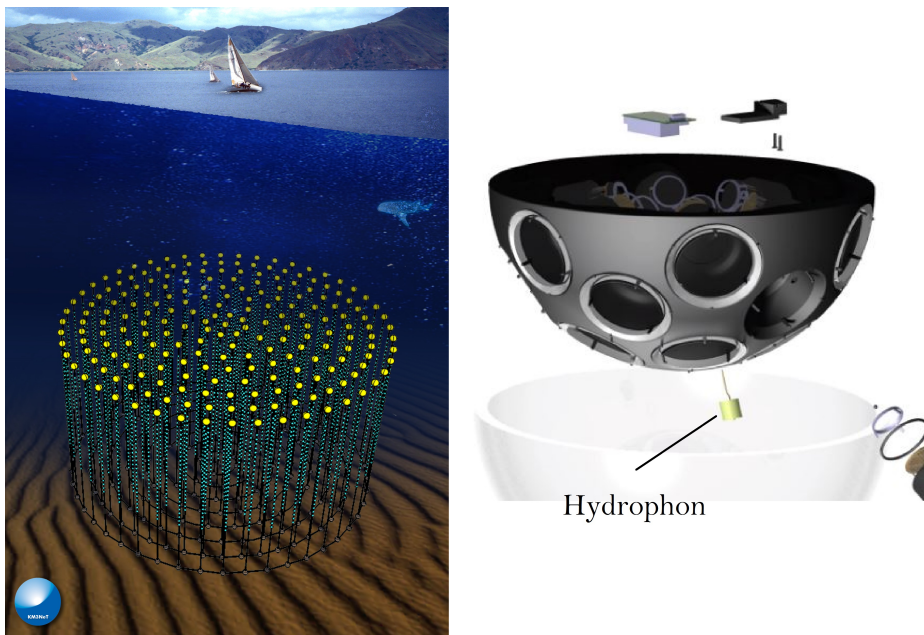




# 1 Einleitung

Neutrinos zu detektieren ist ein wichtiger Schritt, um neue Erkenntnisse über das Universum zu sammeln. Sie entstehen unter anderem beim Zerfall von Pionen, die wiederum aus Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit Materie entstehen. Da Neutrinos einen extrem kleinen Wirkungsquerschnitt besitzen, können sie einen enormen Weg zurücklegen, ohne mit Materie zu reagieren. Dementsprechend kann eine Detektion der Neutrinos mitsamt Erkenntnissen darüber, aus welcher Richtung das Neutrino kommt, Aufschluss über die Quellen kosmischer Strahlung geben. [1]

Das KM3NeT-Neutrinooteleskop wurde konzipiert, um Neutrinos und ihre Herkunftsrichtung indirekt über Zerfallsprodukte des Neutrinos zu detektieren. Im Installationsprozess befindend, soll es als Nachfolger von ANTARES auf dem Grund des Mittelmeeres stehen und aus zylinderförmig angeordneten vertikalen Strängen bestehen, an denen die DOMs ("Digital Optical Module") angebracht werden. [2]



**Abb. 1** Anordnung der Stränge des KM3NeT-Teleskops (links) und Position eines Hydrophon im DOM (rechts, Abbildung bearbeitet); Abbildungen entnommen aus [2]

Eine Hälfte eines DOM ist in Abbildung 1 auf der rechten Seite als Graphik zu sehen. Mit Hilfe der DOMs ist sowohl eine optische als auch eine akustische Neutrino detektion möglich. Die optische Detektion wird durch die "photo-multiplier tubes" (PMTs) ermöglicht, für den akustischen Teil besitzt ein DOM ebenfalls ein Hydrophon, das ein Piezo-Element enthält. Ein Hydrophon ist ein akustischer Sensor, der für den Betrieb in Wasser ausgelegt ist.

Da mit einem Detektor lediglich eine Teilchendetektion, jedoch keine Richtungsortung möglich ist, benötigt man eine riesige Anzahl an DOMs, deren Daten relativ zu einander verglichen werden können und durch die verschiedenen Detektionszeitpunkte der Weg eines vom Neutrino erzeugten Sekundärteilchens verfolgt werden. Ein genauerer Detektionsprozess wird im folgenden Kapitel dokumentiert.

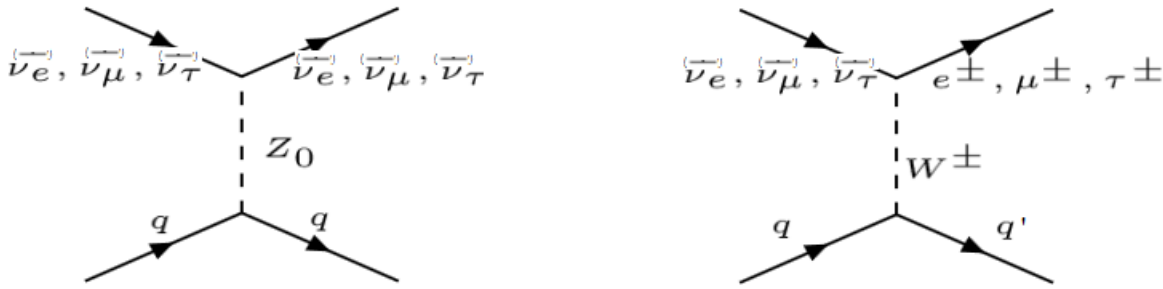
Eine wichtige Voraussetzung für eine gelungene Ortung ist, dass die speziellen Eigenschaften der einzelnen Detektoren bekannt sind. Dazu zählt vor allem die bei der Triangulation zur Positionierung des Emitters entstehende Zeitverzögerung. Diese Zeitverzögerung, die in einem Hydrophon sowie im Signalverarbeitungssystem der akustischen Neutrino detektion entsteht, soll in dieser Arbeit gemessen werden.

## 2 Der Detektionsprozess

Das Neutrino wechselwirkt weder elektromagnetisch noch stark, es finden lediglich Wechselwirkungen über die schwache Kraft statt. Das ist auch der Grund des geringen Wirkungsquerschnitts und der großen Reichweite. Allerdings kann es dadurch auch nicht direkt nachgewiesen werden. Stattdessen detektiert man Zerfallsprodukte, die durch Reaktionen des Neutrinos mit Materie, genauer gesagt mit einem Atomkern, entstehen.

### 2.1 Wechselwirkungen des Neutrinos

Ein Neutrino wechselwirkt in der Tiefsee durch den Austausch eines elektromagnetisch geladenen W- oder eines neutralen Z-Bosons mit Quarks eines Atomkerns. Diese Wechselwirkungen sind in Abbildung 2 skizziert.



**Abb. 2** Das Neutrino reagiert über ein Z- (links) oder ein W-Boson (rechts). Feynman-Graphen erstellt auf feynman.aivazis [3]

Links ist die Wechselwirkung über ein Z-Boson mit einem Quark eines Atomkerns im Wasser zu sehen. Das Quark wird dabei aus dem Atom herausgeschlagen und es entsteht ein Teilchenschauer. Auf der rechten Seite wird das (Anti-)Neutrino in ein geladenes (Anti-)Lepton umgewandelt (und das Quark in eines mit anderem Ladungsvorzeichen). Die neu entstandenen Leptonen sind dabei teils so hochenergetisch, dass sie Cherenkov-Strahlung emittieren können. Ist das Lepton ein Myon, erzeugt es eine Spur, die mittels Cherenkov-Strahlung nachgewiesen werden kann.

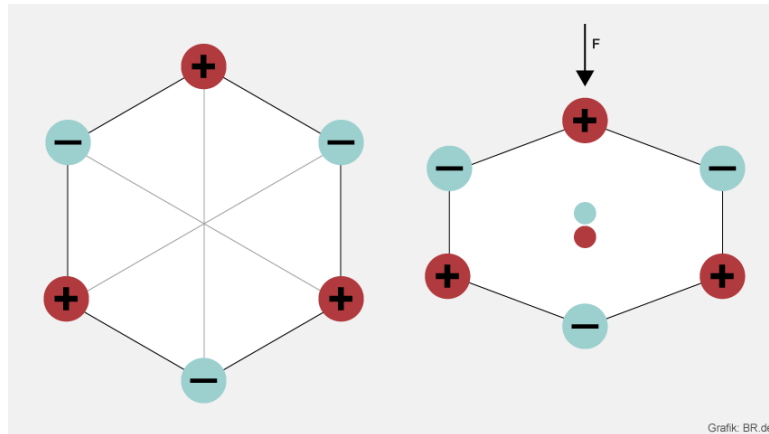
### 2.2 Cherenkov-Strahlung

Die Lichtgeschwindigkeit ist in Wasser und anderen Materialien durch das Absorbieren und Reemittieren der Photonen in den Wasseratomen kleiner als im Vakuum. Demnach können hochenergetische Teilchen eine Geschwindigkeit besitzen, die über im Wasser geltenden Lichtgeschwindigkeit liegt. In diesem Fall emittieren geladene Teilchen die sogenannte Cherenkov-Strahlung. Das an den Atomen vorbeikommende Teilchen polarisiert die Elektronenhüllen der Atome und erzeugt somit ein Dipolmoment. Bei Teilchengeschwindigkeiten mit  $v < c$  können sich die in einer Reihe erzeugten Dipole gegenseitig ausrichten und in der Summe auslöschen. Übersteigt die Teilchengeschwindigkeit allerdings die Lichtgeschwindigkeit im Medium, ist dies nicht mehr möglich und es entsteht ein effektiver Dipol, der elektromagnetische Strahlung kegelförmig entsendet [4]. Diese kann nun in Detektoren wie den DOMs nachgewiesen werden. Es gibt aber noch eine weitere Möglichkeit, welche in KM3NeT ebenfalls Umsetzung findet, die akustische Neutrinodetektion.

## 2.3 Nachweis akustischer Signale im Wasser

### 2.3.1 Das Piezo-Element

Für die akustische Signaldetektion nutzt man den Piezoeffekt aus. Im Hydrophon ist ein Piezoelement eingebaut, das nach folgendem Prinzip funktioniert:



**Abb. 3** Eine mechanische Kraft führt zur Verschiebung der Ladungsschwerpunkte; Abbildung entnommen aus [7]

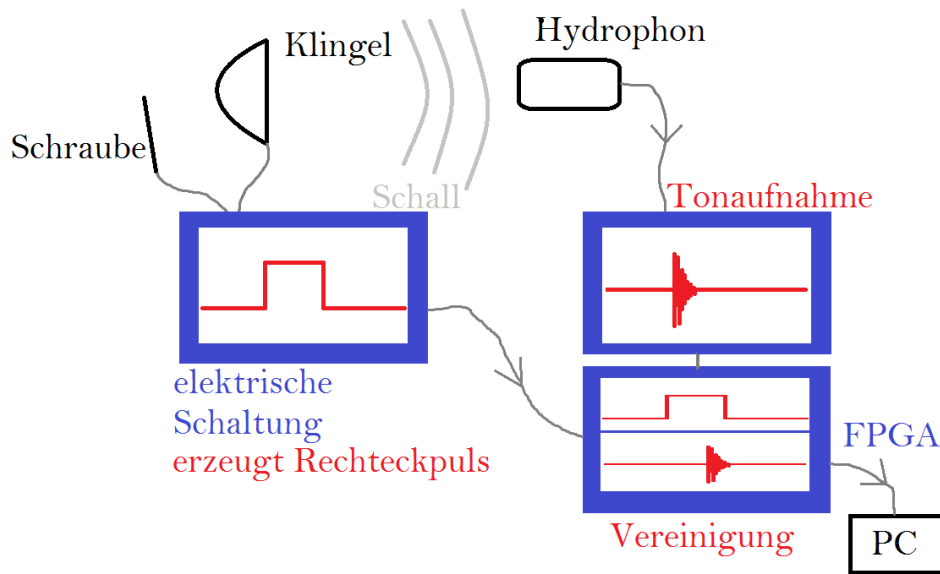
Im Ausgangszustand (links) sind die positiven und negativen Ladungen so angeordnet, dass beide Ladungsschwerpunkte genau zusammenfallen, sodass keine resultierende Spannung entsteht. Wird auf das Element allerdings eine Kraft ausgeübt, verschieben sich die Ladungsschwerpunkte gegeneinander und eine Spannung wird messbar. Je größer die wirkende Kraft, desto stärker wird die Spannung [7].

### 2.3.2 Signalverarbeitung im Octopus-board

Im Experiment wird das sogenannte Octopus-board verwendet (in diesem Fall die Version 3, im Teleskop wird Version 4 verwendet [8]), auf dem zur Verarbeitung des digitalen akustischen Signals eine Elektronikarte (das "piggy-back-board") mit einem FPGA angebracht ist.[2] Ein FPGA ("Field Programmable Gate Array") ist ein elektrisches Schaltelement, das aus vielen Logikgattern besteht, die miteinander verschaltet werden können und somit ein komplexes Programm eingebrannt werden kann. Anwendung dazu wird in Kapitel 3.3 ersichtlich.

Außerdem befindet sich auf dem Board ein digitales Filter. Digitale Filter erzeugen eine Zeitverzögerung, in diesem Fall macht dies den größten Teil der zu messenden Verzögerung aus. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ebenfalls ein digitales Filter verwendet und näher erklärt.

### 3 Versuchsaufbau



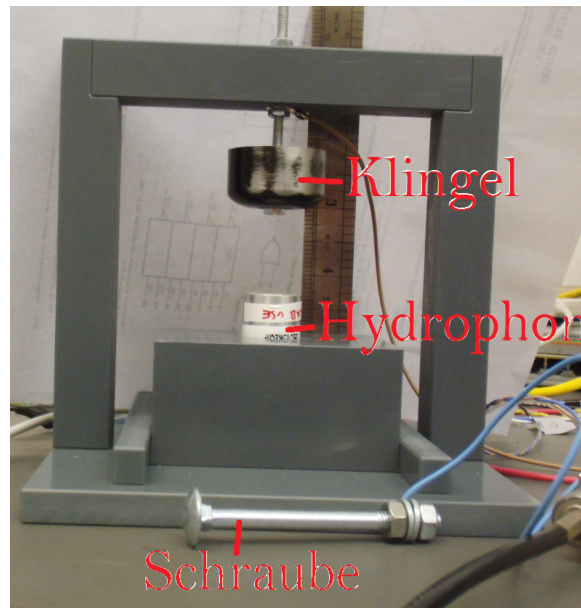
**Abb. 4** Schematischer Aufbau, Einzelkomponenten werden in diesem Kapitel erklärt

Das Ziel ist nun, die Verzögerung, die durch den analogen Teil im Hydrophon (also das Piezo-Element) sowie vor allem durch den digitalen Teil beim Aufnahme- und Speichervorgang entsteht, zu messen. Dazu müssen folgende Forderungen erfüllt werden:

- (1) Ein Ton muss erzeugt werden, der vom Hydrophon registriert wird.
- (2) Der tatsächliche Zeitpunkt des auftretenden Tons muss festgehalten werden. Hierzu wird eine elektrische Schaltung verwendet, die ein elektrisches Signal erzeugt und gleich noch genauer erläutert wird.
- (3) Die vom Hydrophon registrierten digitalen Daten müssen mit dem Zeitpunkt des auftretenden elektrischen Signals verglichen werden können.
- (4) Der Versuch muss zur Verbesserung der Statistik häufig wiederholt werden können.

#### 3.1 Erzeugen und Aufnehmen eines Tonsignals

Die Erzeugung eines Tons ist natürlich kein Problem. In diesem Experiment verwendet man eine handelsübliche (Fahrrad-)Klingel (bzw. im Verlauf des Versuchs mehrere), die durch anschlagen ein Klingeln erzeugt. Die Klingel befindet sich in einer bestimmten Entfernung über dem Hydrophon (siehe Abbildung 5).



**Abb. 5** Der Aufbau mit Klingel und Hydrophon. Die Schraube wird gegen die Klingel geschlagen.

Die Distanz zwischen Klingel und Hydrophon kann dabei variiert werden, sodass der Versuch in verschiedenen Abständen durchgeführt werden kann. Dadurch können Aussagen über die Konsistenz der Messergebnisse getroffen werden. Bei der Auswertung muss die Zeit, die der Schall benötigt, um den Zwischenraum zwischen Klingel und Hydrophon zu durchqueren, von der später bestimmten Verzögerung abgezogen werden. Unter Standardbedingungen beträgt die Schallgeschwindigkeit in Luft [15]

$$v_{Schall} = 343,2 \frac{m}{s} = 343,2 \frac{mm}{ms}$$

Letztere Schreibweise ist für den Versuchsaufbau vorteilhaft, da die Abstände im Millimeter- und die entstehenden Verzögerungen sowie in späteren Diagrammen alle Zeitskalen im Millisekundenbereich liegen. Weiterhin kann man nicht sicher davon ausgehen, dass im Versuchslabor Standardbedingungen herrschen, spätere Messergebnisse legen eine kleine Abweichung der Schallgeschwindigkeit vom Literaturwert im Versuchslabor nahe.

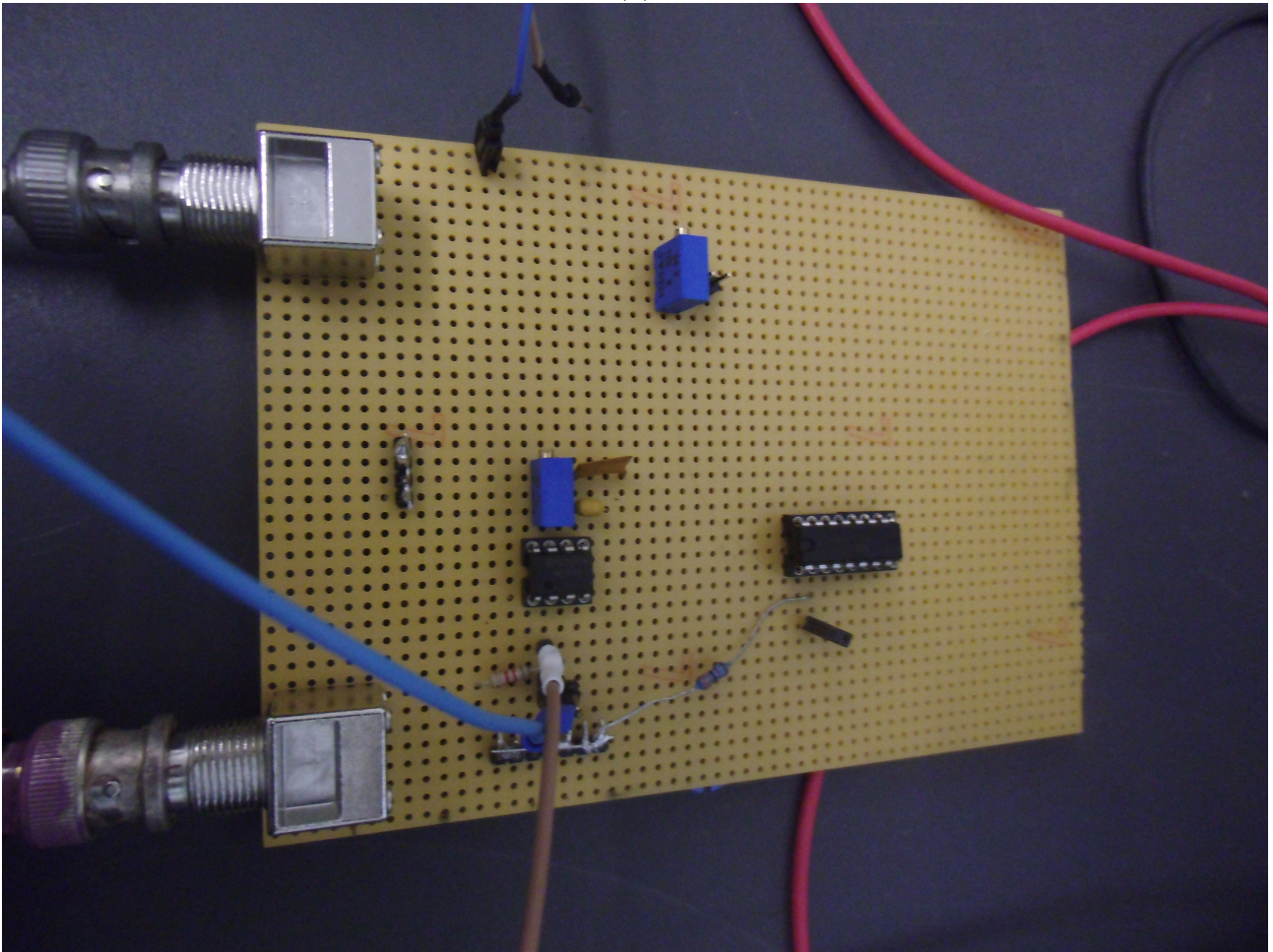
Die im Hydrophon registrierten Daten werden nach der digitalen Verarbeitung mittels des Programmes Digicheck aufgenommen und im wav-Dateiformat abgespeichert.

### 3.2 Festhalten des Signalzeitpunktes

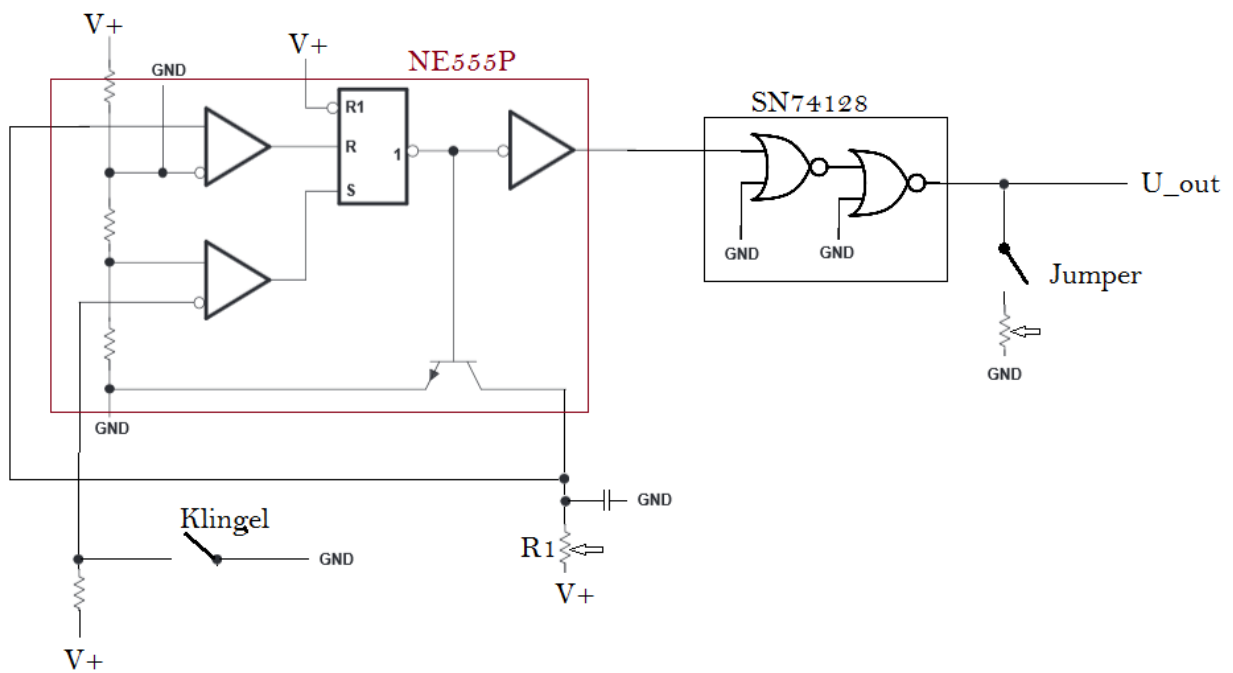
Es muss nun der tatsächliche Zeitpunkt, an dem das Tonsignal erzeugt wurde, bestimmt werden (in Relation zum vom Hydrophon registrierten Signal). Hierzu bedient man sich einer manuell zusammengebauten elektrischen Schaltung (siehe Abbildung 6).



(a)



(b)



**Abb. 6** (a) Foto der Schaltung und (b) ein qualitativer Schaltplan; Teile der Graphik entnommen aus [10]

Die Klingel wird über eine an ihr angebrachte Vorrichtung bzw. später mit einem Klöppel (in diesem Fall einer Schraube) betätigt. Sowohl Klingel als auch Schraube sind an die Schaltung angeschlossen.

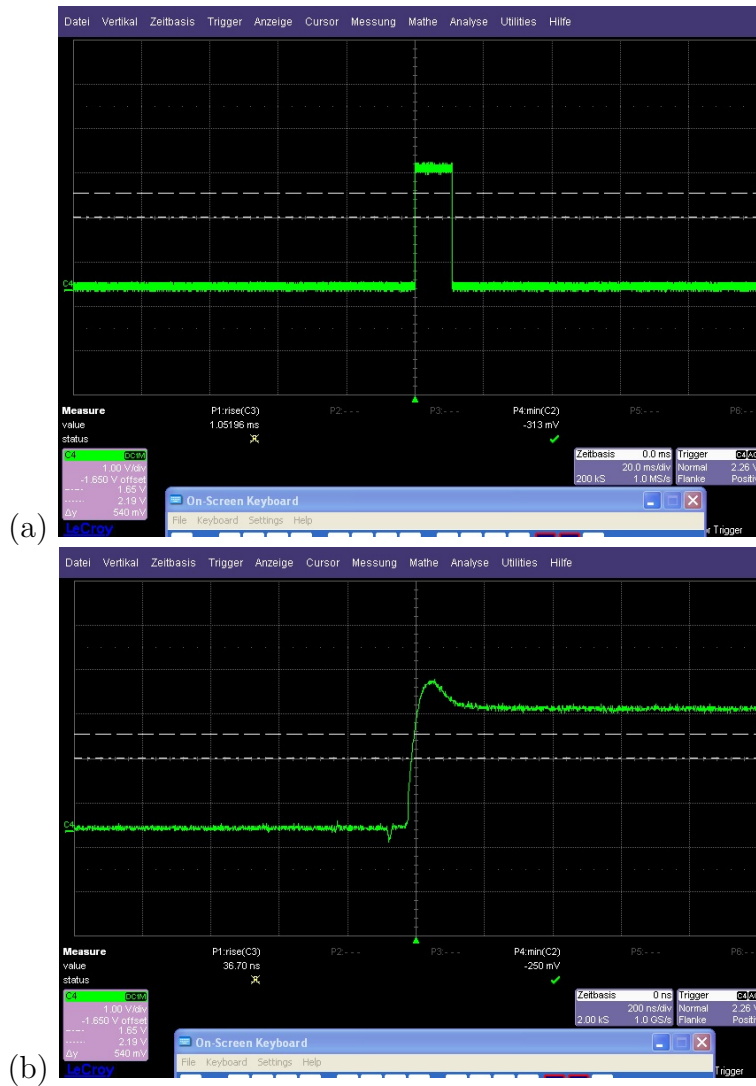
Die integrierte Schaltung "NE555P" kann aus einer kurzen einmaligen Input-Spannung einen über einen längeren Zeitraum konstanten Output erzeugen. Fällt der Trigger unter einen bestimmten Wert, wird der Output auf high ( $V+$ ) gesetzt. Dies passiert, wenn die Klingel betätigt wird, denn dann fällt der Input auf low (GND). Gleichzeitig öffnet sich der Discharge-Eingang. Dadurch steigt der Wert am Threshold-Eingang. Überschreitet dieser Wert eine gewisse Grenze, wird der Output wieder auf Low gesetzt. Über den regelbaren Widerstand  $R_1$  kann die Dauer des Rechtecksignals variiert werden [10].

Damit ist das Ziel der Schaltung eigentlich schon erreicht, trotzdem wird das Signal anschließend durch ein weiteres IC, den SN74128, geleitet. Dieser verfügt über eine eigene Stromquelle und kann somit ausreichend Strom liefern und die gewollte Output-Spannung auch bei einer Terminierung der Leitung mit  $50\ \Omega$  aufrechterhalten. Das Output-Signal soll sich beim Durchgang durch den IC nicht ändern, SN74128 fungiert jedoch als NOR-Gatter.

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

**Tab. 1** Wahrheitstafel des NOR-Gatters

Input 1A liegt auf low, wird 1B auf high gesetzt, fällt der Output auf low. Deshalb wird das Signal anschließend noch einmal durch ein NOR-Gatter des selben ICs geschickt. 4B liegt dann auf low, 4A auch, damit wird ein high-Output erreicht [11]. Die Verbindung über das Potentiometer zu GND war für Testzwecke gedacht und war während der Messung deaktiviert (Jumper nicht gesteckt). Die Terminierung erfolgte am Oszilloskop



**Abb. 7** Ein rechteckiger Puls (a); Skala: horizontal  $20 \frac{ms}{div}$ , vertikal  $1 \frac{V}{div}$ . In (b) ist der Anstieg des elektrischen Signals im Detail zu sehen; Skala: horizontal  $200 \frac{ns}{div}$ , vertikal  $1 \frac{V}{div}$

In Abbildung 7(a) sieht man den Output der Schaltung bei einem Anschlag. Abbildung 7(b) zeigt den Anstieg des Pulses im Detail. Zu sehen ist, dass der Anstieg nicht unendlich steil ist, sondern sich auf einem Zeitraum von nicht größer als  $200ns$  ausbreitet. Allerdings ist diese Unsicherheit im Vergleich zu den anderen statistischen und systematischen Fehlern, die im Experiment auftreten werden, verschwindend gering.

### 3.3 Vergleichbarkeit - Zwei Kanäle im Aufnahmeprogramm

Nun wird also das im Hydrophon registrierte und das elektrische Signal festgehalten. Um beide Signale vergleichen zu können, führt man das elektrische Triggersignal in den zweiten Kanal eines Stereo-Signals. Dies geschieht im integrierten FPGA, das Dateiformat ist dabei das AES/EBU Audio-Format. Der erste Kanal erhält somit die Daten des Hydrophons, der zweite das elektrische Signal. Nun sind beide Signale simultan über der gleichen Zeitskala gespeichert und können verglichen werden. Das Piggy-back-board erzeugt natürlich auch eine Verzögerung, in der finalen Version ist es allerdings nicht vorhanden. Da in diesem Board beide Stereo-Kanäle bereits wie gewünscht gefüllt sind, trägt diese Verzögerung nicht zur Gesamtverzögerung bei.



### 3.4 Ein eigenes Programm zur Datenanalyse

Zur Analyse der Daten wird ein Programm verwendet, das auf dem vom CERN entwickelten Programm ROOT [9] basiert. Das C++ Programm, dessen Grundform von R. Lahmann übernommen wurde, wird im Verlauf des Versuchs aufgrund der auftretenden Ergebnisse immer wieder modifiziert. Es liest die Daten aus der wav-Datei ein, verarbeitet und plottet diese.

Der zweite Kanal erhält dabei bis auf den Zeitpunkt des Erscheinens der elektrischen Signale keine weiteren relevanten Informationen, sodass der Teil keiner graphischen Darstellung erfordert. Lediglich dieser Zeitpunkt dient als Triggersignal und stellt den Nullpunkt der Zeitskala da, über die die Informationen aus Kanal 1 geplottet und gespeichert werden.

Das Programm kann auch mehrere Signale, die in einer Datei gespeichert sind, verarbeiten und separat plotten, sodass problemlos eine ganze Versuchsreihe mit mehreren Triggersignalen und Tönen aufgenommen werden kann. Beispiele für Plots des Signals sind im kommenden Kapitel enthalten.

## 4 Analysevorgang der Signale

Die Frequenz der Clock, die zur Aufnahme des Signals verwendet wird, beträgt  $f_{Clock} = 24,576 MHz$ . Da ein Aufnahmewert jedoch jeweils über 128 Perioden der Clock gesampled wird, beträgt die tatsächliche Abtastrate

$$f_{sample} = \frac{24,576 MHz}{128} = 192 kHz$$

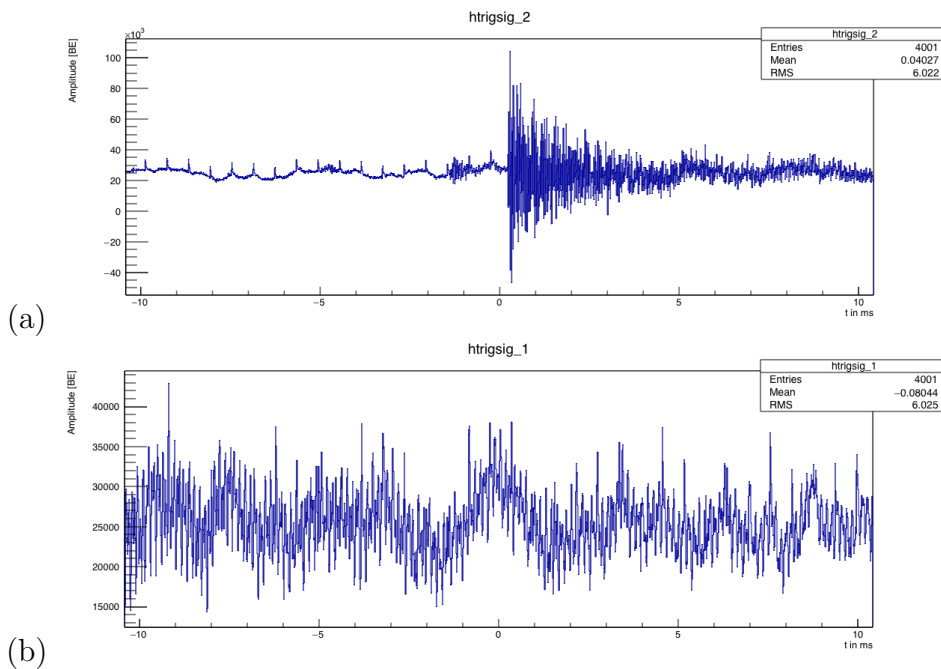
Das heißt, die zeitliche Differenz zweier benachbarter Daten beträgt

$$t_e = \frac{1}{192000} s = 0,0053082 ms$$

Diese Zeit  $t_e$  ist die kleinste Zeiteinheit, die in den Messungen eine Rolle spielt. In Anlehnung an das Prinzip der Elementarladung wird diese Zeitspanne im Folgenden als "Elementarzeit" betitelt.

### 4.1 Erste Einblicke und erste Probleme

Abbildung 8 wurde mit dem oben erwähnten C++ Programm generiert und mit root dargestellt.



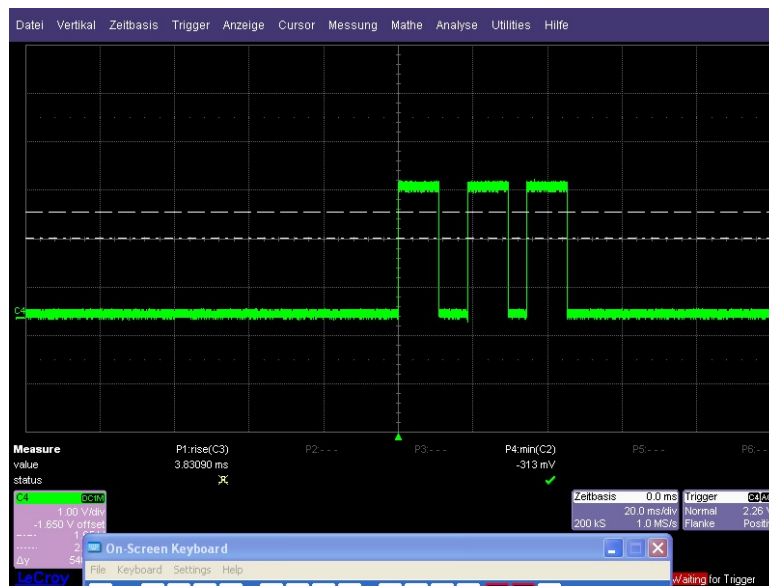
**Abb. 8** Zwei Signale - (a) ein brauchbares Signal; (b) ein unbrauchbares Signal; die horizontale Achse zeigt die Zeit in  $ms$ , die vertikale Achse die Amplitude in beliebigen Einheiten

In Abbildung 8 sind zwei Signale enthalten. Abb. 8(a) enthält ein für die Analyse brauchbares Signal, Abb. 8(b) dagegen lediglich ein Rauschen nahezu konstanter Amplitude. Die vertikale Achse ist mit "Amplitude [BE]", das für "beliebige Einheiten" steht, beschriftet. Die Absolutwerte der Amplitude entstammen dem Aufnahmeprogramm und sind nicht relevant. In Abb. 8(a) sieht man auf der horizontalen Achse den Bereich von  $-10ms$  bis  $+10ms$ . Zum Zeitpunkt  $t = 0$  trifft das elektrische Triggersignal ein, um diesen Zeitpunkt wird das Tonsignal geplottet. Man erkennt einen eindeutigen Anstieg der Signalamplitude kurz nach dem Nullzeitpunkt und anschließend einen sanften Abfall. Außerdem sind vor dem Tonsignal, also im Rauschen periodische Zacken zu sehen. Diese werden durch das "piggy-back-board" auf dem Octopus-board erzeugt, die genaue Ursache ist jedoch nicht bekannt. Sie werden bei späteren

Auswertungen Probleme bereiten.

Weiterhin ist ersichtlich, dass das Signal nicht um den Null-Wert der vertikalen Skala oszilliert, sondern einen gewissen Offset hat, da der digitale Wert 0 nicht exakt einer Eingangsspannung von  $0V$  entspricht.

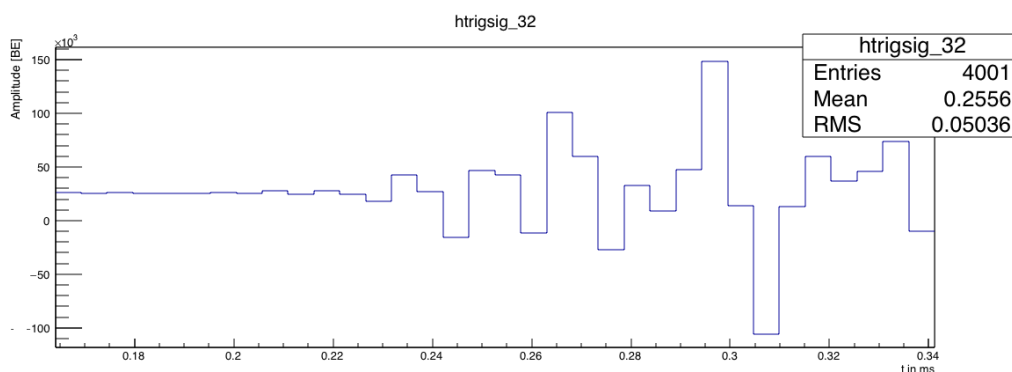
In Abb. 8(b) ist kein klares Signal zu erkennen, es sieht nach einem konstanten Rauschen aus. Dieses Rauschen entsteht, wenn ein Anschlag an die Klingel nicht ein, sondern mehrere Signale kurz hintereinander auslöst. Dies passiert, da es schwierig ist, einen perfekten Anschlag auszuführen, ohne die Klingel dabei mehrmals zu berühren. Der erste Anschlag liefert ein brauchbares Ergebnis, der zweite ein Signal, dessen Nullzeitpunkt mitten im vom Hydrophon detektierten Geräusch liegt oder bereits zu einem Zeitpunkt, an dem das Signal nicht mehr vom Rauschen unterschieden werden kann und somit keine Aussagekraft enthält. Abb. 9 zeigt ein Foto des Oszilloskops, an dem so ein mehrmaliger Trigger sichtbar gemacht wird.



**Abb. 9** Ein Anschlag kann auch mehrere Trigger erzeugen. Skala: horizontal  $20 \frac{ms}{div}$ , vertikal  $1 \frac{V}{div}$

Wie diese Signale, die die Auswertung drastisch verfälschen würden, herausgefiltert werden können, wird in Kapitel 4.4 beschrieben, erst einmal wird eine Methode eingeführt, mit der der Signalanfang eines brauchbaren Signales quantitativ bestimmt werden kann.

## 4.2 Überschreiten einer Schwelle



**Abb. 10** Detailbereich eines Singnalanfangs

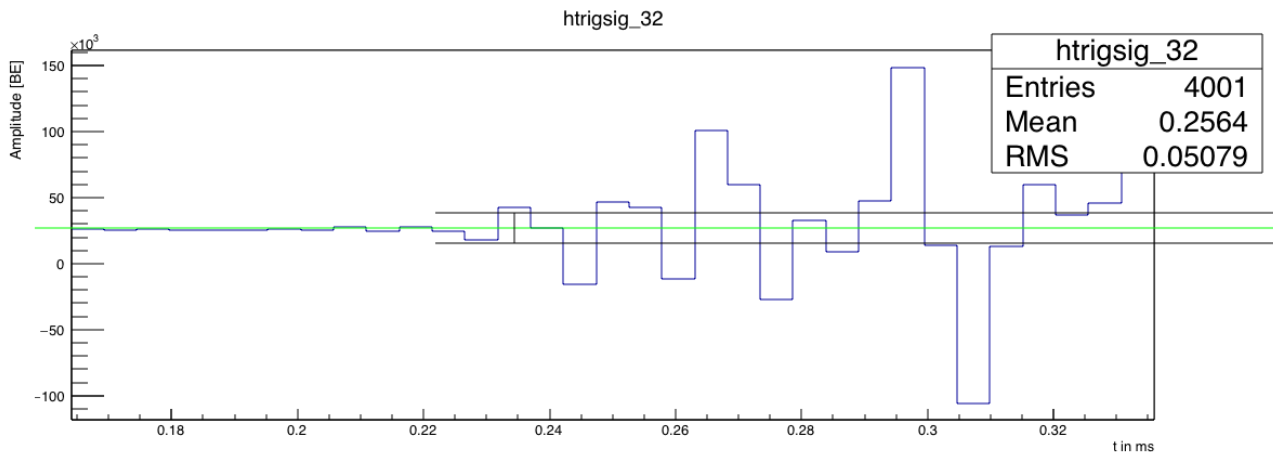
In Abbildung 10 ist ein Signalanfang im Detail zu sehen. Für die Analyse ist es wichtig, einen klaren Anfangszeitpunkt des Signals zu definieren. Bei Betrachtung der Abbildung fällt auf, dass

dies nicht absolut eindeutig ist. Als ein sinnvolles Kriterium gilt sicherlich "der Signalanfang ist da, wo das Signal sich deutlich vom vorherigen Rauschen absetzt". Man definiert sich demnach eine "Rauschzeit", eine Zeit ab dem Nullpunkt über einen möglichst langen Zeitraum bis zu einem Zeitpunkt, an dem auf jeden Fall noch kein Signalanfang eingetroffen ist. Dieser Zeitpunkt muss natürlich bei Variation der Höhe der Klingel und somit der Entfernung vom Hydrophon angepasst werden.

In diesem Zeitraum berechnet das Programm die Varianz  $V$  und die Standardabweichung  $\sigma$ , Maße für die Fluktuationen um den Mittelwert  $M$ :

$$V = \frac{\sum_{i=0}^A (y(i) - M)^2}{A}$$

mit der Anzahl  $A = \frac{t_{max}}{t_e}$ , wobei  $t_{max}$  das Ende der Rauschzeit ist und  $M = \sum_{i=0}^A y(i)$ . Die Standardabweichung  $\sigma = \sqrt{V}$  gibt außerdem den Standardfehler für den Mittelwert an. Nach Passieren der Rauschzeit wird überprüft, ob das Signal einen bestimmten Faktor der Standardabweichung über oder unter dem Mittelwert liegt, der Wert  $Faktor \cdot \sigma$  ist die "Triggerschwelle". Bei Überschreiten oder Erreichen der Triggerschwelle wird dieser Zeitpunkt als Signalanfang gewertet. Eine graphische Veranschaulichung zeigt Abbildung 11:



**Abb. 11** Mittelwert und Triggerschwelle

Die grüne Linie ist der Mittelwert in der Rauschzeit, der im Idealfall auch nahezu dem Mittelwert des gesamten Signales entspricht, die schwarzen horizontalen Linien bilden die Triggerschwelle. Die schwarze vertikale Linie zeigt den Zeitpunkt an, an dem die Triggerschwelle überschritten wird. Die Triggerschwelle wird dabei so gewählt, dass der Signalanfang auch etwa der optischen Wahrnehmung entspricht.

Damit wäre die Frage des Signalanfangs geklärt. Allerdings gibt es, wie bereits gesehen, auch unbrauchbare Signale, die die Statistik verfälschen. Dazu zählen nicht nur die Rauschsignale, sondern auch solche, bei denen zwar der Anschlagtrigger korrekt dargestellt ist, die jedoch keinen klaren Signalanfang erkennen lassen. Solche Signale sollen herausgefiltert werden. Eine Möglichkeit besteht mittels einer Methode, die in diesem Kapitel bereits angewendet wurde und jetzt beschrieben werden soll.

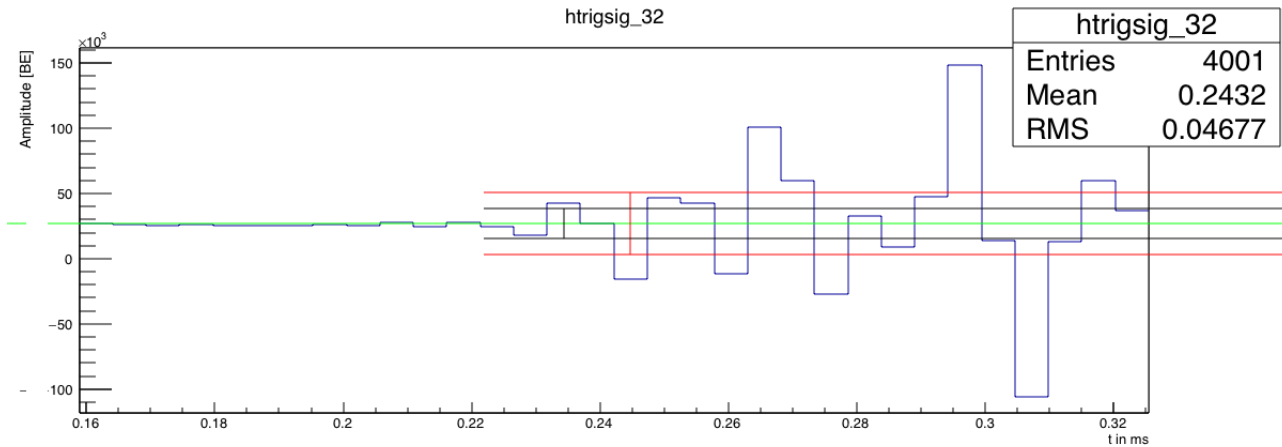
### 4.3 Eine ausreichend starke Signalsteigung

Sowie über eine Triggerschwelle ein Zeitpunkt für den Signalanfang gefunden werden kann, kann man die gleiche Methode auch zweimal anwenden, allerdings mit einer anderen Triggerschwelle. Dadurch erhält man nun zwei Zeitpunkte, die zu den zwei Triggerschwellen gehören. Diese kann man vergleichen und ein Kriterium aufstellen, das Signale, die nicht stark genug

steigen, aussortiert: Die Zeitpunkte beider Trigger dürfen nur eine hinreichend kleine Zeitspanne auseinanderliegen. Somit definiert man sich eine minimal notwendige Signalsteigung

$$\Delta m = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

mit  $\Delta T = \text{Obere Triggerschwelle} - \text{Untere Triggerschwelle}$  und  $\Delta t$  der maximalen Steigzeit. In Abbildung 12 sieht man die erweiterte Analyse:



**Abb. 12** Eine zweite Triggerschwelle wird hinzugefügt

Die rot hinzugekommene Linie zeigt die obere Triggerschwelle mit Auslösezeitpunkt. In diesem Beispiel liegen beide Zeitpunkte zwei  $t_e$  auseinander, sodass das Signal als gültig angesehen werden kann.

Als Signalanfang kann weiterhin die erste Schwelle, im Folgenden "Frühtriggerschwelle" genannt dienen, die "Spättriggerschwelle" dient der Aussortierung von Signalen zu kleiner Steigung. Bei Betrachtung mehrerer Messungen fällt allerdings auf, dass dieses Kriterium in Spezialfällen nicht genug ist, da auch Rauschsignale manchmal ausreichend starke Steigungen vorweisen. Diese müssen daher durch ein weiteres Kriterium herausgenommen werden.

## 4.4 Gute Signale sind stark

Was unterscheidet ein brauchbares Signal von Rauschen, abgesehen von der genauen Form, denn diese zu analysieren wäre doch ein größerer Aufwand. Ein Blick auf die Abbildung 8 verrät es: Die "Lautstärke", hier physikalisch die globale maximale Amplitude, ist bei einem Klingelsignal wesentlich höher als bei Rauschen. Dies kann verwendet werden, um die Rauschsignale auszusortieren: Die Varianz in der Rauschzeit wurde ja bereits berechnet und als Schwellenmaß verwendet. Nun kann man eine dritte  $\sigma$ -Schwelle, die noch einmal wesentlich höher liegt als die des Früh- und des Spät-Triggersignals, einführen. Kriterium für ein Signal, das (dann hoffentlich) von einem gewollten Anschlag herrührt, ist, dass das Signal in einer großen Zeitspanne (groß ist hierbei natürlich relativ gesehen, die Zeitspanne befindet sich im Bereich von 10ms) die dritte Schwelle überhaupt irgendwann überschreitet.

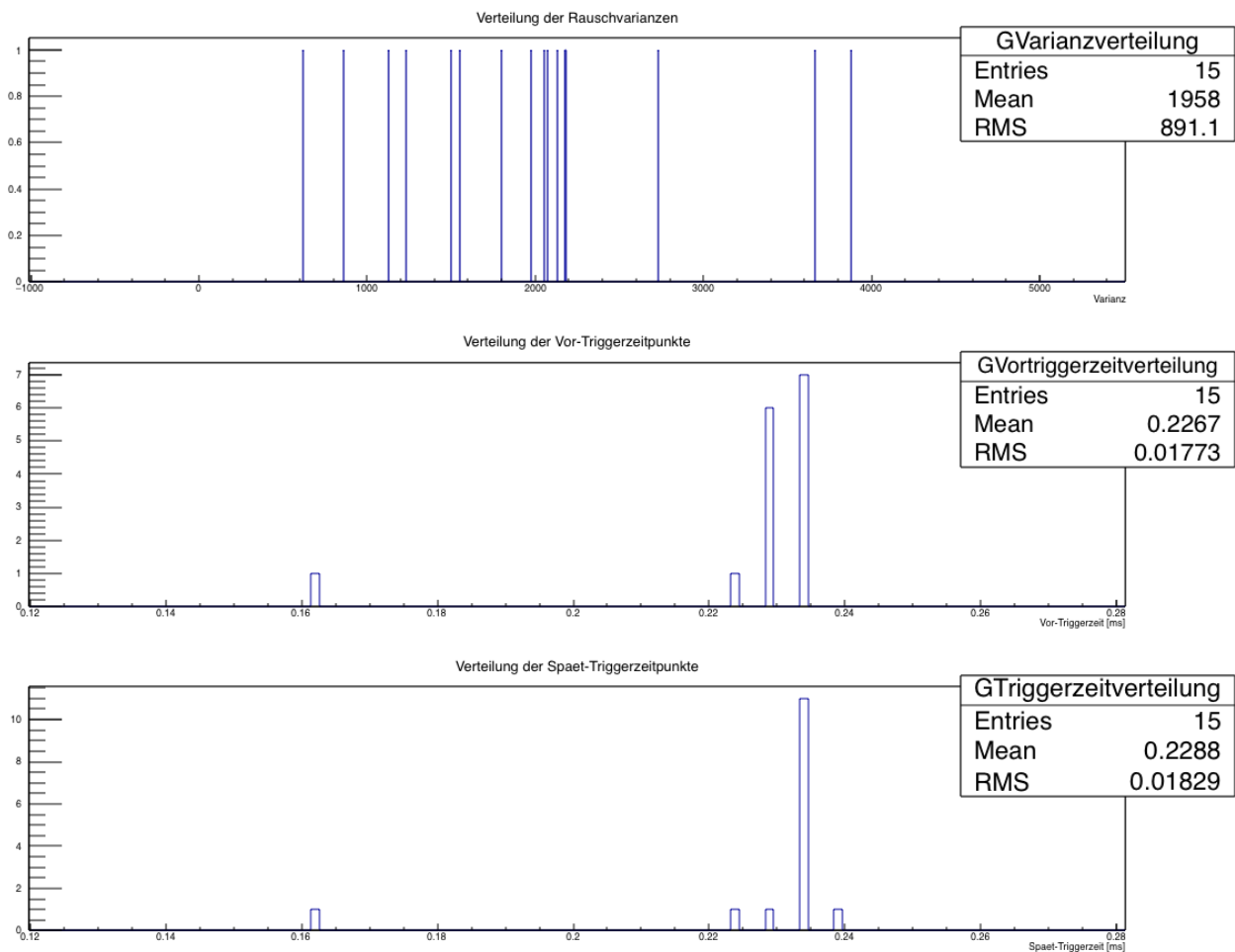
Damit sollte man eine gute Basis für die Auswertung einer Messreihe geschaffen haben. Mit einer Testreihe wird eine erste Analyse durchgeführt.

## 4.5 Periodische Peaks

### 4.5.1 Ein Störgeräusch

Abbildung 13 zeigt das Ergebnis einer Messreihe mit 20 Anschlägen (damit ist die im Kopf mitgezählte Anzahl gemeint, also eventuell nicht die tatsächliche Anzahl der Berührungen von

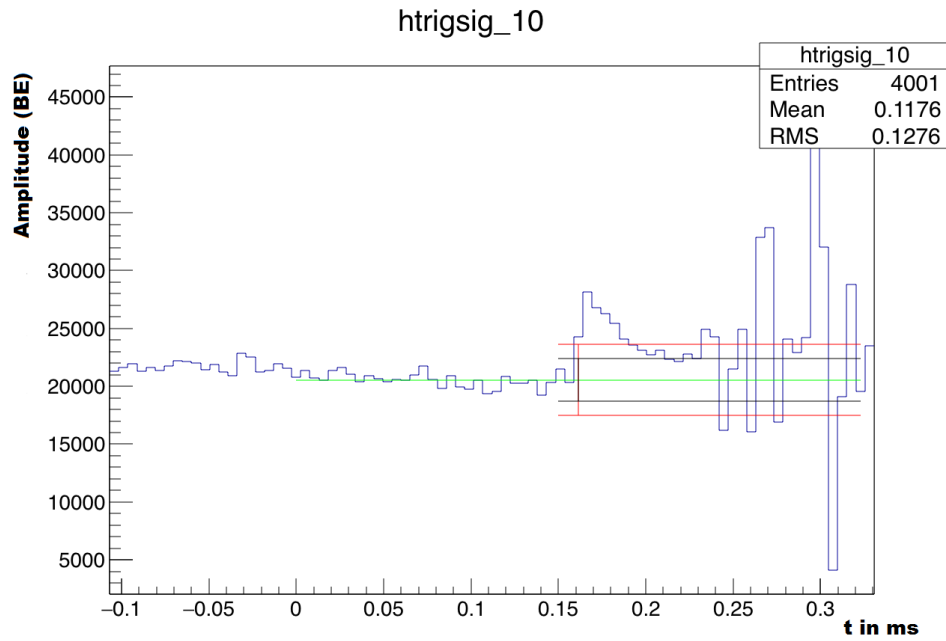
Schläger und Glocke, siehe Kapitel 4.1). Bei dieser Testmessung wurde der Abstand zwischen Klingel und Hydrophon nicht bestimmt, da die Messung noch kein präzises Ergebnis, sondern lediglich einen Test des Programms liefern soll. Dabei wurden die unbrauchbaren Signale gemäß den bereits eingeführten Kriterien herausgefiltert. Die Abbildung enthält drei Histogramme. Das obere Histogramm zeigt die Verteilung der Rauschvarianzen. Da die Rauschvarianz keine diskreten Werte besitzt, kommt es nicht vor, dass zwei Signale die gleiche Rauschvarianz ergeben. Das mittlere Diagramm zeigt die Verteilung des Früh-Triggersignals, das untere die des Spät-Triggersignals. Die möglichen Zeitpunkte sind in der Tat diskret, sie sind ein Vielfaches der Elementarzeit. Dementsprechend lässt auch eine möglichst exakte Angabe des Triggerzeitpunkts eine Verteilung mit mehreren Ereignissen pro Zeitpunkt zu.



**Abb. 13** Der kleinste Wert in den unteren beiden Diagrammen fällt aus der Reihe

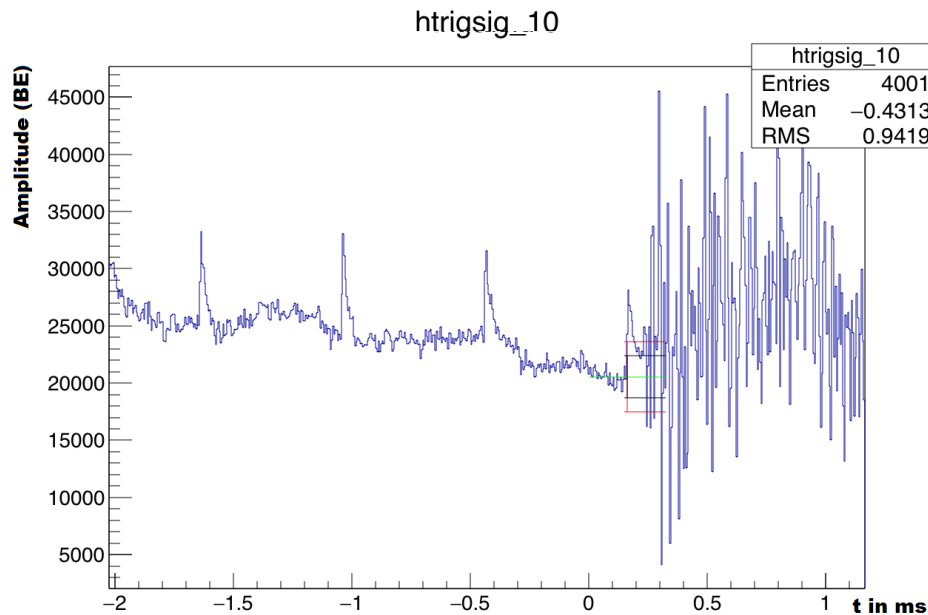
Die Einheit von  $\sigma$  ist dieselbe wie die Einheit auf der vertikalen Achse in den Signal-Diagrammen. Es ist ersichtlich, dass die Standardabweichung eine sehr große Streuung aufweisen kann und dennoch ein gültiges Signal entsteht.

Die Triggerzeitpunkte sind wie immer in dieser Arbeit in  $ms$  angegeben. Man sieht sowohl beim frühen, als auch beim späten Trigger eine auf einen kleinen Zeitraum beschränkte Verteilung (die Abstände zwischen den hohen Balken betragen genau eine Elementarzeit). Jedoch gibt es in beiden Fällen eine Ausnahme: Bei einem gültigen Signal lösen sowohl der frühe als auch der späte Trigger am gleichen deutlich zu frühen Zeitpunkt aus. Das bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt sowohl die kleine als auch die größere Schwelle überschritten wurde (hier bei etwa  $0.16ms$ , da die Entfernung zwischen Klingel und Hydrophon hier nicht gemessen wurde, enthalten die genauen Werte auf der horizontalen Achse allerdings keine Aussagekraft). Dieses Signal kann schnell gefunden werden, der Auslösevorgang ist in Abbildung 14 dargestellt.



**Abb. 14** Der plötzliche Peak führt zum verfrühten Auslösen

Die Ursache für den Auslöser ist klar: Ein im Rauschsignal auftretender Peak, der nicht mit dem Klingensignal korreliert ist, sorgt für das Überschreiten beider Triggerschwellen. Könnte man bei Betrachtung von Abbildung 14 noch denken, dass es sich hierbei um ein zufälliges Ereignis handelt, kommt man auf einen anderen Entschluss, wenn man dieses Signal einmal in einem größeren Zeitbereich untersucht.



**Abb. 15** Die Peaks treten periodisch auf

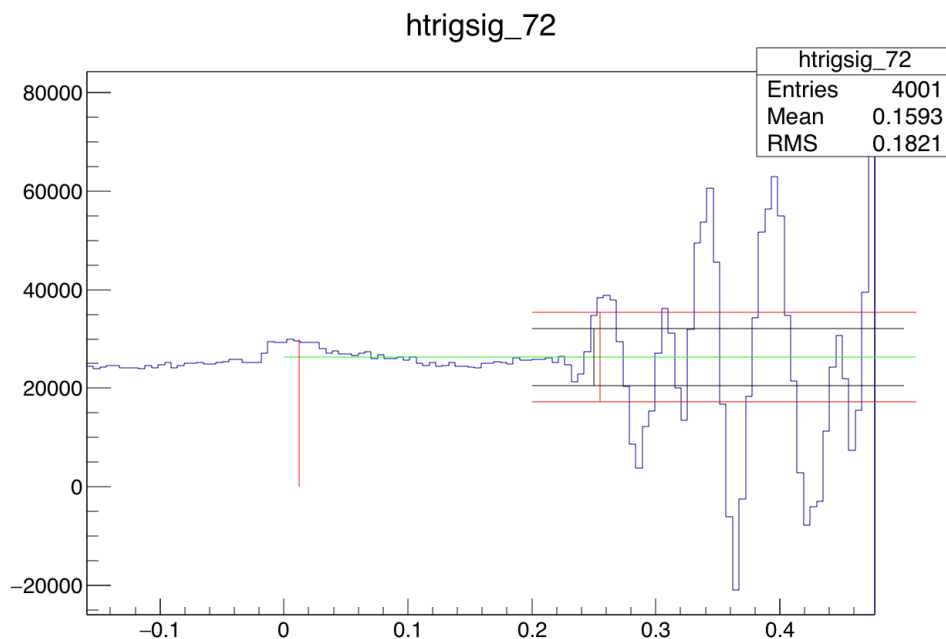
Abbildung 15 zeigt, dass der Peak einer periodischen Reihe von Peaks ist, die schon in Abbildung 8(a) sichtbar war. Wie oben bereits angemerkt, sind genaue Gründe für die Entstehung nicht bekannt. Folglich kann man sie auch nicht ausstellen, man muss sie also bei der Betrachtung der Signale berücksichtigen.

#### 4.5.2 Peakvorhersage und Peakkriterium

Da die Peaks periodisch sind, reicht es, die Periode und die Lage eines Peaks zu kennen, um die anderen vorauszusagen. Das Programm sucht das Maximum des Signals in einer Zeitspanne vor dem Signal, in der auf jeden Fall ein Peak liegt. Die Periode liegt, wie in Abbildung 15 gut zu schätzen ist, im Bereich von  $0,6ms$ . Sucht man sich also das Maximum des Signals in einer Zeitspanne von z.B.  $2ms$  vor dem Nullpunkt, so kann man davon ausgehen, dass das Maximum die Lage eines Peaks angibt.

Die Periode lässt sich dabei aus der Graphik ablesen (die Zeit zwischen zwei Maxima), folglich kann man weitere Peaks voraussagen. Wenn Peaks nun in den interessanten Bereichen auftreten, werden diese Signale ebenfalls von der Statistik ausgenommen. Welche zählen aber zu den interessanten Bereichen?

Am offensichtlichsten der Bereich, an dem die Trigger auslösen, Konsequenzen wurden in vorangegangenem Kapitel klar. Liegt ein Peak in der Nähe des Auslösepunktes des Triggers (in der Nähe deswegen, weil ein Peak offensichtlich eine gewisse Ausdehnung hat und nicht nur das Maximum des Peaks für ein Auslösen der Trigger in Frage kommt), wird das Signal aussortiert. Aber auch die Zeitspanne des angenommenen Rauschsignals zählt zu den interessanten Bereichen. Ein Peak in der Rauschzeit führt zu einer drastischen Erhöhung der Standardabweichung. Folglich liegt auch der absolute Wert der Auslöseschwellen höher und die Trigger lösen eventuell bei einem späteren Zeitpunkt aus. Wie auf früheren Abbildungen zu sehen, beginnt das akustische Signal nicht mit der größten Amplitude, sondern baut sich in einem gewissen Zeitraum auf. Dann verfälscht ein Auslösen bei einem späteren Zeitpunkt ebenso die Statistik.



**Abb. 16** Ein Peak in der Rauschzeit vergrößert die Standardabweichung und dadurch die Schwellwerte

Die Fälle, bei denen ein Peak in der Rauschzeit liegt, werden folglich ebenfalls aussortiert. Das führt allerdings bei größeren Entfernungen zwischen Klingel und Hydrophon zu einem drastischen Prozentsatz an unbrauchbaren Signalen (zur Erinnerung: Die Rauschzeit beginnt bei  $t = 0$ , dem elektronischen Triggersignal, und geht bis zu einem möglichst großen Zeitpunkt, an dem das akustische Signal noch nicht eingesetzt hat). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Peak in der Rauschzeit liegt, steigt schließlich linear mit der Größe der Rauschzeit und damit auch mit der Entfernung.



### 4.5.3 Weitere Peakprobleme

Das Peakkriterium wurde unter der Annahme eingeführt, dass die Periode der Peaks für alle Situationen konstant ist. Das stimmt allerdings nur näherungsweise. Im Laufe des Experiments werden verschiedene Klingeln verwendet. Es zeigt sich, dass die Peakperiode sich dabei jedes Mal minimal ändert. Sogar bei Änderung der Entfernung zwischen Klingel und Hydrophon konnten minimale Unterschiede in der Periode festgestellt werden. Im Mittel beträgt die Periode etwa  $0,60ms$ , kann aber um etwa  $0,03ms$  variieren. Die Ursache dafür ist, wie auch die Ursache für die Entstehung der Peaks, unbekannt, die leichten Änderungen der Peaks je nach Situation müssen natürlich berücksichtigt und die im Programm verwendete Periode angepasst werden.

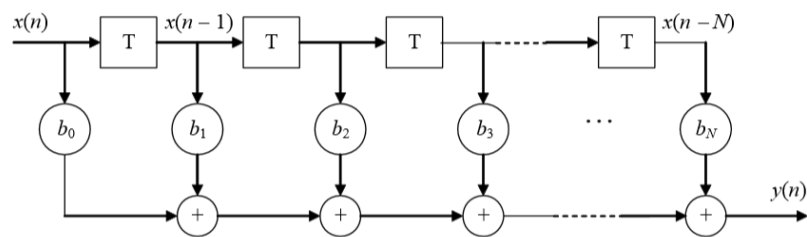
## 4.6 Die Einhüllende - Eine Vergleichsmethode

Oben beschriebene Methodik kann als eine komplette Signalanalyse aufgefasst werden und liefert in der Tat Ergebnisse mit Fehlern im akzeptablen Bereich. Genauere Ergebnisse werden in späteren Kapiteln dieser Arbeit veröffentlicht.

Es ist allerdings sinnvoll, eine Vergleichsmethode einzuführen, die auf einem anderen Prinzip basiert als die  $\sigma$ -Trigger-Methode. Hierzu verwendet man ein FIR-Filter, ein digitales Filter, mit dem man eine Einhüllende um das Signal bilden kann.

### 4.6.1 Das Prinzip eines FIR-Filters

FIR steht für Finite Impulse Response, das heißt, dass die Antwort auf einen Dirac-Impuls eine endliche Zeitdauer hat. Ein FIR-Filter funktioniert wie folgt:



**Abb. 17** Das Schema eines FIR-Filters. Abbildung entnommen aus [12]

Die Werte des Originalsignals werden nach und nach in ein Array gefüllt und mit  $n$  verschiedenen Gewichtungsfaktoren  $b_i$  "gemittelt". Die neuen Werte werden dabei stets an Position *null* geleitet, während alle Werte um eine Position (in Abbildung 17 nach rechts) verschoben werden. Ist das Array voll, werden die ältesten Werte von neueren verdrängt und spielen für die Mittlung keine Rolle mehr. Dabei gibt es genau so viele Koeffizienten  $b_i$ , wie es Speicherplätze im Werte-Array gibt. Mathematisch ergibt sich für den Ausgang  $y(n)$  [12]:

$$y(n) = \sum_{i=0}^N b_i \cdot x(n-i)$$

Besäßen nun zum Beispiel alle  $N+1$  Koeffizienten den Wert  $\frac{1}{N+1}$ , könnte man von einer echten Langzeitmittlung sprechen, wie man es in etwa bei Aktienkursen oft zu sehen bekommt. Auch anhand dessen ist ersichtlich, dass das gefilterte Signal keine plötzlichen Sprünge macht und somit genau solche einmaligen Ausschläge im Originalsignal nahezu ignoriert werden. Lediglich längerfristige Änderungen machen sich bemerkbar. Anders ausgedrückt fungiert das Filter gleichzeitig als Tiefpass. Mittels solch eines Tiefpasses kann eine Einhüllende des Originalsignals erzeugt werden.

## 4.6.2 Bilden einer Einhüllenden

Im vorangegangenen Kapitel beschriebener Vorgang bildet eine Art wandernden Mittelwert. Um daraus eine Einhüllende zu erstellen, ist es nötig, den gefilterten Wert um den globalen Mittelwert des ursprünglichen Signals zu reduzieren und zu quadrieren.

## 4.6.3 Zeitverzögerung im Filter

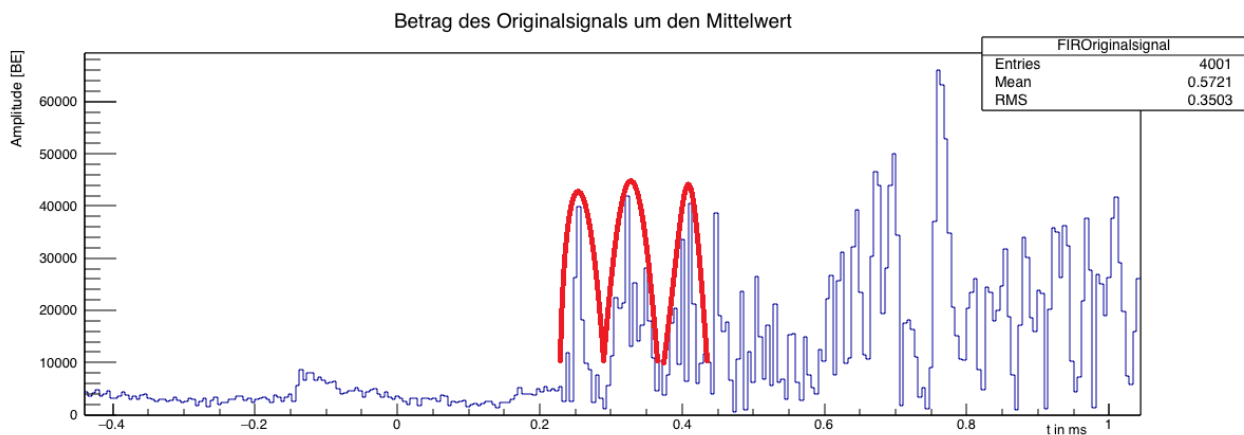
Ein digitales Filter erzeugt beim Filtern eines Signals eine Zeitverzögerung. Wie bereits erwähnt, besitzt auch das Aufnahmeboard ein digitales Filter, die in diesem Experiment gemessene Zeitverzögerung resultiert sogar hauptsächlich davon.

Will man gefilterte Signal "zeitgleich" über dem Originalsignal plotten, was für die Auswertung der Ergebnisse essenziell ist, muss die Zeitverzögerung durch das FIR-Filter berücksichtigt werden. Ein FIR-Filter mit  $n$  Koeffizienten erzeugt eine Verzögerung von  $\frac{n-1}{2}$  Schritten. In diesem Fall benutzt man einen Filter mit 65 Koeffizienten, was eine Verschiebung des gefilterten Signals um  $\frac{65-1}{2} = 32$  Schritte in negative Zeit-Richtung nötig macht.

## 4.6.4 Tiefpass-Filter

Ein exaktes Mittelwertfilter ist als Tiefpass allerdings nicht optimal. Eine wesentliche Kenngröße eines Tiefpasses ist die Cut-Off-Frequenz (Grenzfrequenz), die Frequenz, die im Signal eine Schwächung von  $3dB$  verursacht. Kleinere Frequenzen werden nahezu ungeschwächt übertragen, größere möglichst stark abgeschwächt.

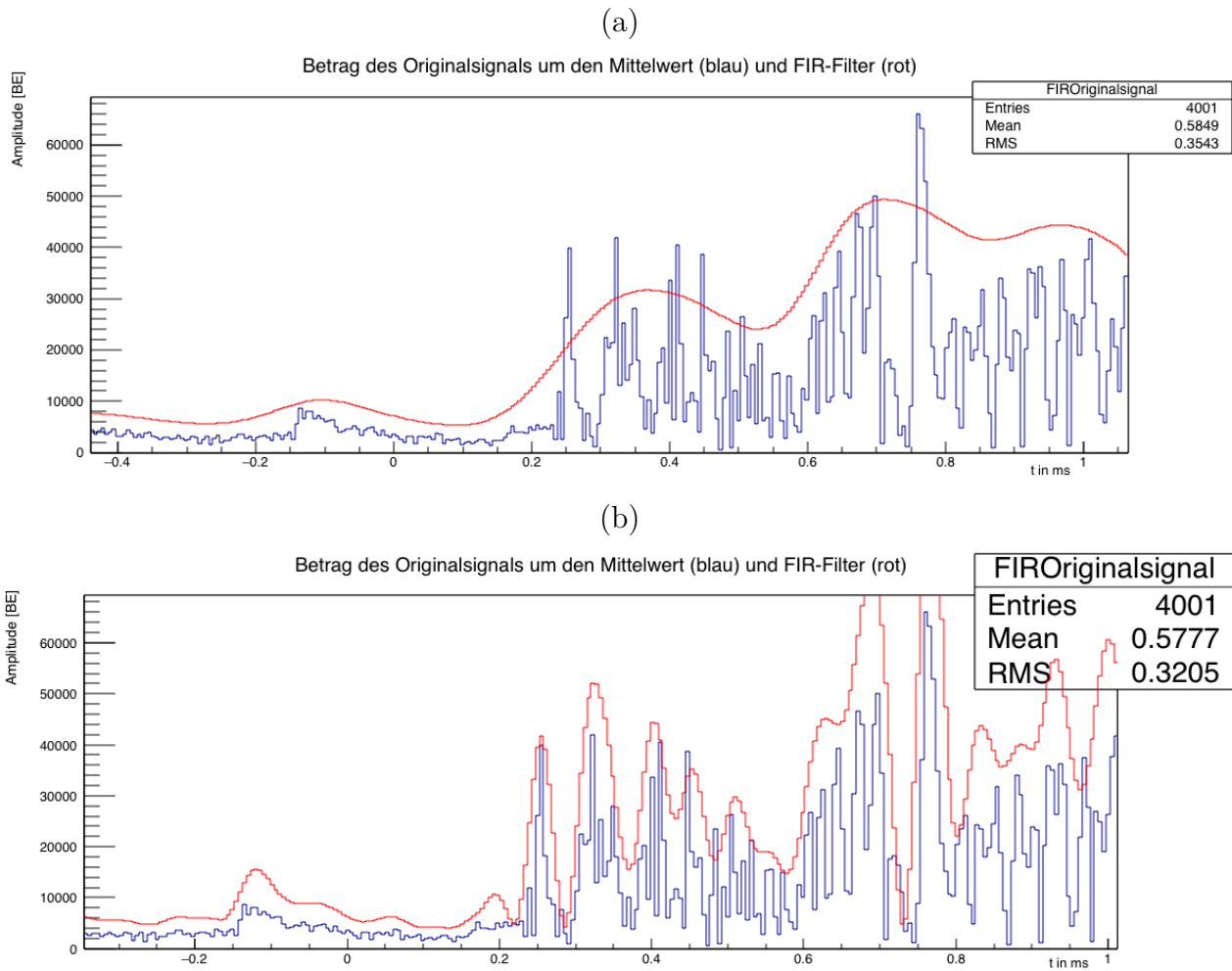
Das Programm Matlab [13] kann bei Angabe der Cut-Off-Frequenz die Koeffizienten des gewünschten Tiefpasses erzeugen. Welche Cut-Off-Frequenz in diesem Experiment gewünscht ist, soll Abbildung 18 verdeutlichen.



**Abb. 18** Schematische Darstellung der gewünschten Einhüllenden (rot)

Das Signal ist diesmal anders als bisher dargestellt. Zu sehen ist der Betrag des um den Mittelwert reduzierten Signals. Die eingezeichneten roten "Berge" sollen die gewünschte Einhüllende darstellen. Aus diesem Diagramm kann man eine grobe Abschätzung für die optimale Cut-Off-Frequenz erhalten, eine genaue Berechnung ist nicht möglich, da das Abschneiden höherer Frequenzen kein idealer Vorgang ist.

Die drei (nicht ganz gleich großen) Wellenberge ziehen sich über einen Zeitraum von etwa  $0,48ms - 0,22ms = 0,26ms$ , das entspricht einer Wellenlänge von  $2 \cdot \frac{0,26ms}{3} = 0,174ms$  (der Faktor 2 rührt daher, dass die Einhüllende hier aus einem (Betrags-)Quadrat des Originalsignals stammt, und eine Wellenlänge über zwei Wellenberge geht) und einer Frequenz von  $f_{grob} = \frac{1}{0,174ms} = 5,75kHz$ . Abbildung 19 zeigt zwei Tests mit Grenzfrequenz von  $2kHz$  und  $20kHz$ .



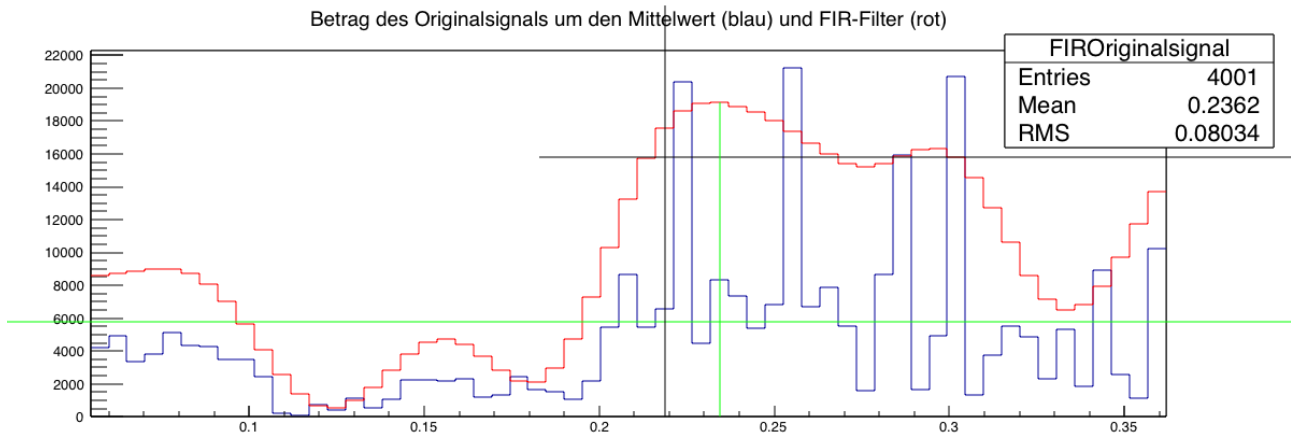
**Abb. 19** Zwei Einhüllende mit Cut-Off-Frequenzen von (a)  $f_G = 2\text{kHz}$  und (b)  $f_G = 20\text{kHz}$

Es ist ersichtlich, dass das Filter mit  $f_G = 2\text{kHz}$ , nicht zum gewünschten Resultat kommt, das mit  $f_G = 20\text{kHz}$  dagegen, liefert ein zufriedenstellendes Ergebnis.  $20\text{kHz}$  ist daher die Cut-Off-Frequenz, die zur Signalanalyse mittels FIR-Fliter verwendet wird.

#### 4.6.5 Auslösemethodik

Das C-Programm ermittelt nun das erste große Maximum des gefilterten Signals. Dies sucht es in einem kleinen Bereich um den Auslösezeitpunkt der  $\sigma$ -Methode. Abbildung 19 (b) zeigt, dass der Bereich nicht zu groß gewählt werden darf, da hier nach dem ersten großen Maximum ein noch größeres folgt. Dementsprechend kann diese Vergleichsmethode nicht als komplett unabhängig von der  $\sigma$ -Methode angesehen werden, trotzdem besitzt der neu ermittelte Wert eine Aussagekraft, Untersuchungen vieler Diagramme zeigen, dass das erste größere Maximum nahezu immer im Bereich um den  $\sigma$ -Triggerzeitpunkt liegt.

Der tatsächliche FIR-Triggerzeitpunkt wird nun aber nicht als das gefundene Maximum des gefilterten Signals gewählt. Stattdessen spielt der Zeitpunkt eine Rolle, an dem das Signal einen gewissen Bruchteil des Maximum-Wertes erreicht hat (siehe Abbildung 20).



**Abb. 20** Überschreitet das gefilterte (rote) Signal einen bestimmten Bruchteil des Maximumwertes (graue horizontale Linie), schlägt der Trigger zu (graue vertikale Linie)

## 4.7 Einstellung der Triggerschwellen

Dieser Bruchteilwert der FIR-Triggermethode ist natürlich kein vorgegebener Wert, sondern wird, wie schon die  $\sigma$ -Triggerschwellen, empirisch bestimmt. Durch Vergrößerung oder Verkleinerung dieses Wertes könnte somit der Mittelwert des FIR-Triggersignals vergrößert oder verkleinert werden. Ziel ist es hierbei nicht, den Wert so zu wählen, dass eine möglichst gute Übereinstimmung mit dem  $\sigma$ -Triggerzeitpunkt zustande kommt, sondern, da man einen Vergleichswert erhalten will, den Wert erneut nach der optischen Wahrnehmung einzustellen.

Allgemein gibt es für alle Triggerschwellen keine eindeutig richtigen Werte. Die letztlich gewählten Werte sind Ergebnisse nach mehrmaligem Festlegen und Ausprobieren. Ein Orientierungspunkt zur Feinjustierung ist dabei auch der Versuch, die Streuung um den Mittelwert zu reduzieren. Natürlich spielt dieser Faktor neben der optischen Wahrnehmung des Signalanfangs nur eine untergeordnete Rolle.

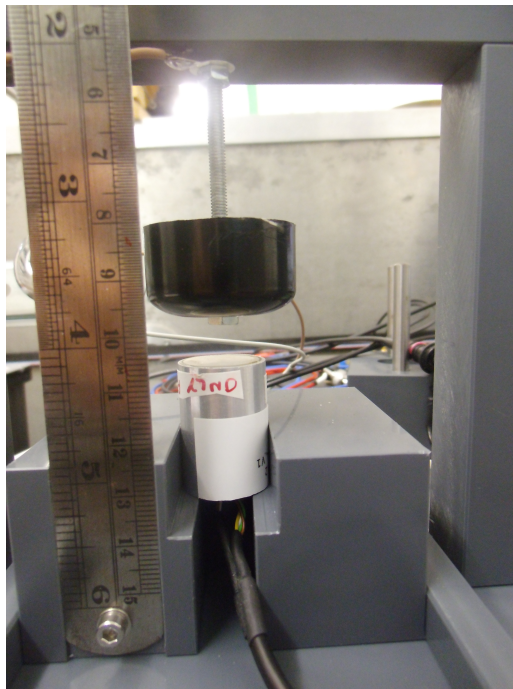
## 5 Versuchsdurchführung

Zur finalen Auswertung wird eine Messreihe in drei Abständen  $d$  von Klingel zu Hydrophon erstellt. Für die Entfernungen  $d = 11mm$ ,  $d = 24mm$  und  $d = 34mm$  werden jeweils 300 Anschläge aufgezeichnet (je drei Dateien zu 100 Anschlägen, die Ergebnisse werden jedoch schließlich zusammengeführt).

### 5.1 Ablesefehler

Zur Bestimmung des Abstandes  $d$  bestimmt man die Positionen von Klingel  $d_K$  und Hydrophon  $d_H$  durch Ablesen an einem Maß. Für die Entfernung ergibt sich demnach offensichtlich

$$d = d_H - d_K$$



**Abb. 21** Wie genau können die Positionen von Klingel und Hydrophon bestimmt werden?

Das Foto soll einen Einblick geben, wie genau die Werte von Klingel und Hydrophon abgelesen werden können. Vor dem echten Versuchsaufbau ist das ein bisschen besser möglich, als es das Foto suggeriert. Für den Ablesefehler wird der Wert  $0,2mm$  angenommen. Da dieser Fehler sowohl auf die Klingel- als auch auf die Hydrophonposition wirkt, gilt für den Fehler auf die Distanz

$$\Delta d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial d_K} \cdot \Delta d_K\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial d_H} \cdot \Delta d_H\right)^2} = 0,2mm \cdot \sqrt{2} = 0,282843mm$$

Dieser Fehler wird für alle drei Entfernungen angenommen.

## 6 Messergebnisse

### 6.1 Ergebnisse der drei Abstandsmessungen

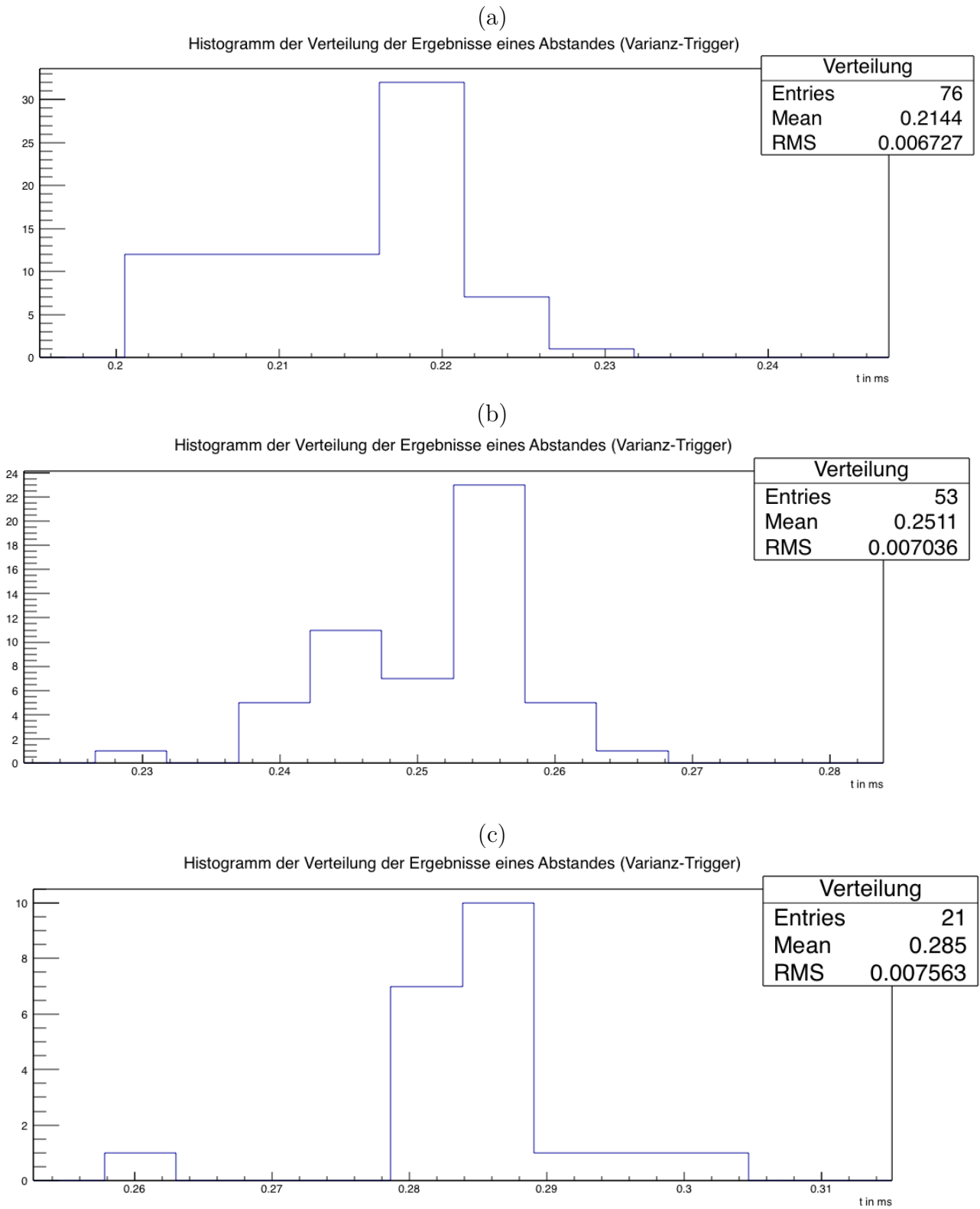
Für jeden der drei Abstände wird ein Histogramm erstellt, das die Verteilung der Messergebnisse zeigt. Zu erwähnen ist, dass die Ergebnisse, Zeitpunkte, aufgrund der endlich großen Abtastrate beim Aufnehmen diskrete Werte annehmen. In Abbildung 22 sieht man die Ergebnisse, die mittels des  $\sigma$ -Triggers zustande kommen. Zur Erinnerung, der  $\sigma$ -Triggerzeitpunkt ist der Auslösezeitpunkt der Frühtriggerschwelle. Abbildung 23 zeigt die Verteilungen, die mittels FIR-Methode entstanden sind. Die auf der horizontalen Achse angegebene Zeit ist die tatsächliche Messzeit, bei der der Abstand zwischen Hydrophon und Klingel und die damit verbundene Schalllaufzeit noch nicht berücksichtigt wird. Entsprechend verschieben sich die Mittelwerte der Messergebnisse der einzelnen Entfernungen. Als Rauschzeit wird jeweils die Laufzeit des Schalls plus einem bei allen Abständen gleichen Wert von  $0,01ms$  gewählt. Für die  $\sigma$ -Triggerschwellen werden dabei für jede Entfernung unterschiedliche Werte verwendet. Dies ist notwendig, da Signale größerer Abstände schwächer sind und sich nicht so deutlich von Rauschen unterscheiden wie Signale kleinerer Abstände. Dementsprechend müssen die Triggerschwellen mit zunehmender Entfernung verkleinert werden. Da das FIR-Triggerprinzip über den Bruchteil eines Maximums funktioniert und das Maximum selber bei kleinen Signalen klein ist, ist eine Variation des FIR-Schwellwertes nicht notwendig. Tabellen 2 und 3 zeigen eine Auflistung der Schwellwerte für die  $\sigma$ - und für die FIR-Triggermethode.

Entfernung	Früh-Triggerschwelle (Faktor)	Spät-Triggerschwelle (Faktor)
$11mm$	7	12
$24mm$	5,5	10,5
$34mm$	3,8	7

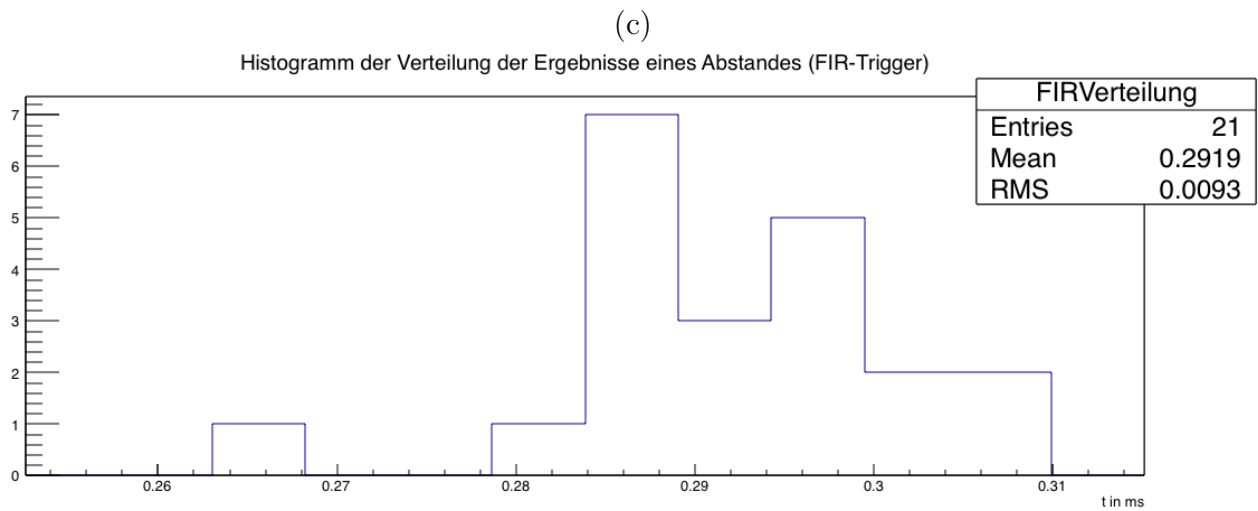
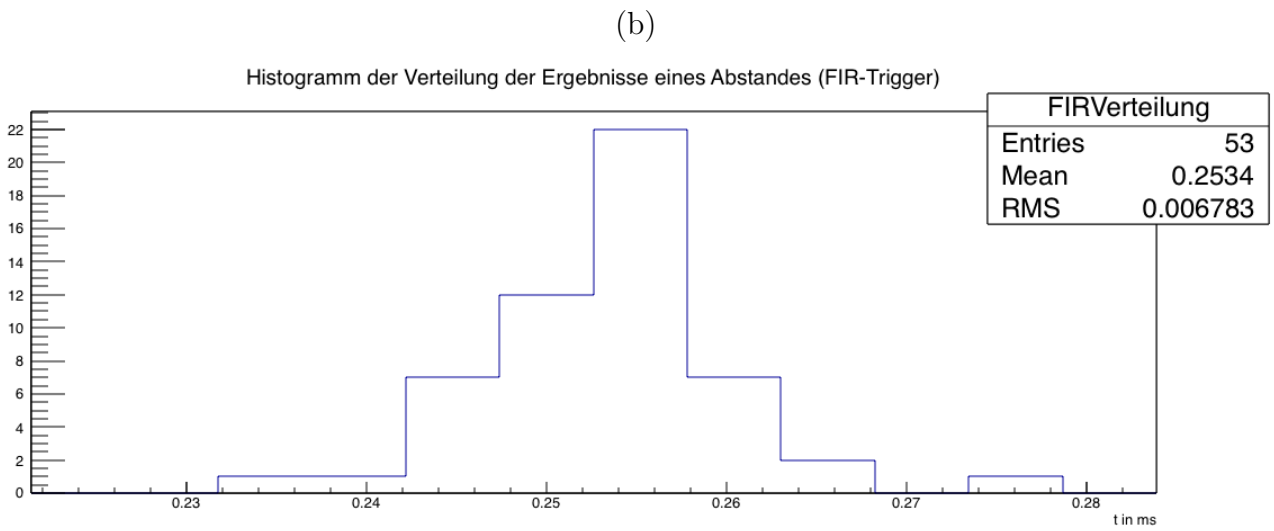
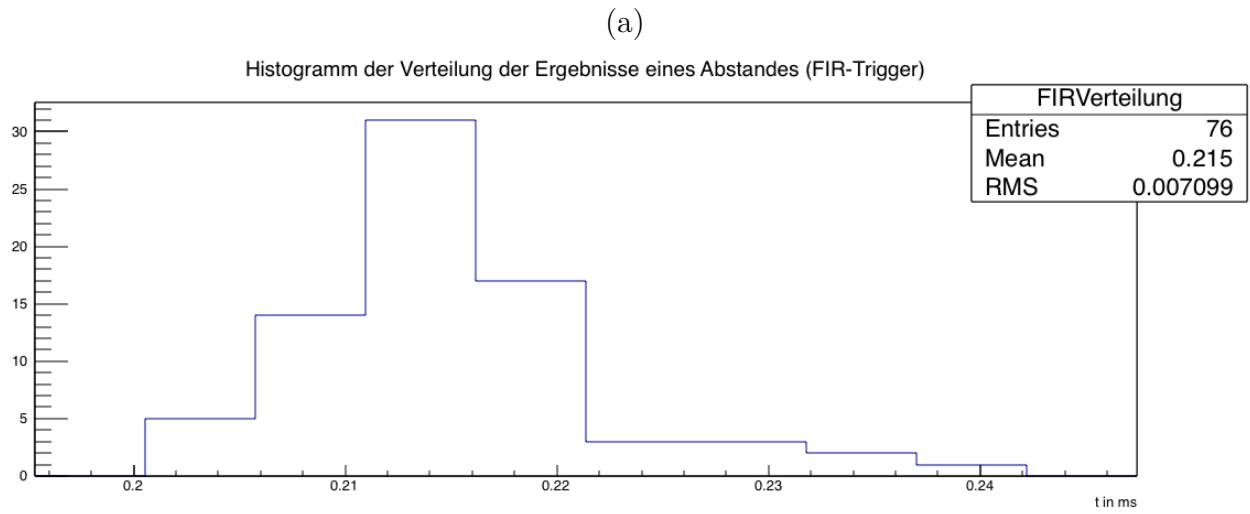
**Tab. 2** Für die Messung verwendete Schwellwerte für die  $\sigma$ -Methode

Entfernung	Auslösewert (Bruchteil)
$11mm$	0,75
$24mm$	0,75
$34mm$	0,75

**Tab. 3** Für die Messung verwendete Schwellwerte für die FIR-Methode



**Abb. 22** Verteilungen der  $\sigma$ -Methode aller Entfernungen. (a)  $d = 11mm$  (b)  $d = 24mm$  (c)  $d = 34mm$



**Abb. 23** Verteilungen der FIR-Methode aller Entfernungen. (a)  $d = 11mm$  (b)  $d = 24mm$  (c)  $d = 34mm$



### 6.1.1 Diskussion der Ergebnisse der $\sigma$ -Methode

Betrachtet wird Abbildung 22. Für die Abstände  $d = 11mm$  und  $d = 24mm$  gibt es jeweils einen herausstechenden Zeitpunkt, bei  $d = 34mm$  eine Anhäufung von Messergebnissen über zwei Zeitpunkte, die eine  $t_e$  auseinander liegen. Es zeigen sich außerdem zwei weitere Faktoren der Messmethodik.

Die Anzahl ("Entries") der verwendeten und somit nach dem Durchlauf durch das Analyseprogramm gültigen Signale nimmt mit zunehmender Entfernung ab. Das ist dadurch bedingt, dass das C++ Programm die Signale, bei denen ein periodischer Peak in der Rauschzeit liegt, aussortiert. Je größer die Entfernung und somit auch die Rauschzeit, desto wahrscheinlicher ist es, dass ein Peak in der Rauschzeit vorhanden ist und desto weniger Signale können als gültig angesehen werden.

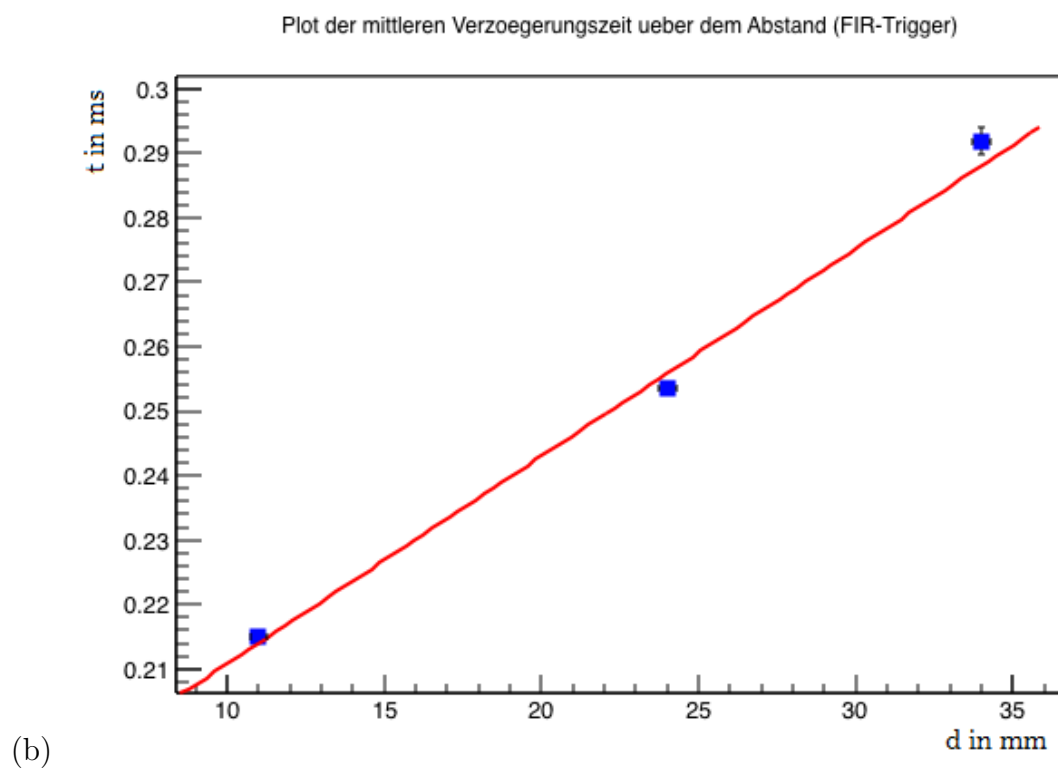
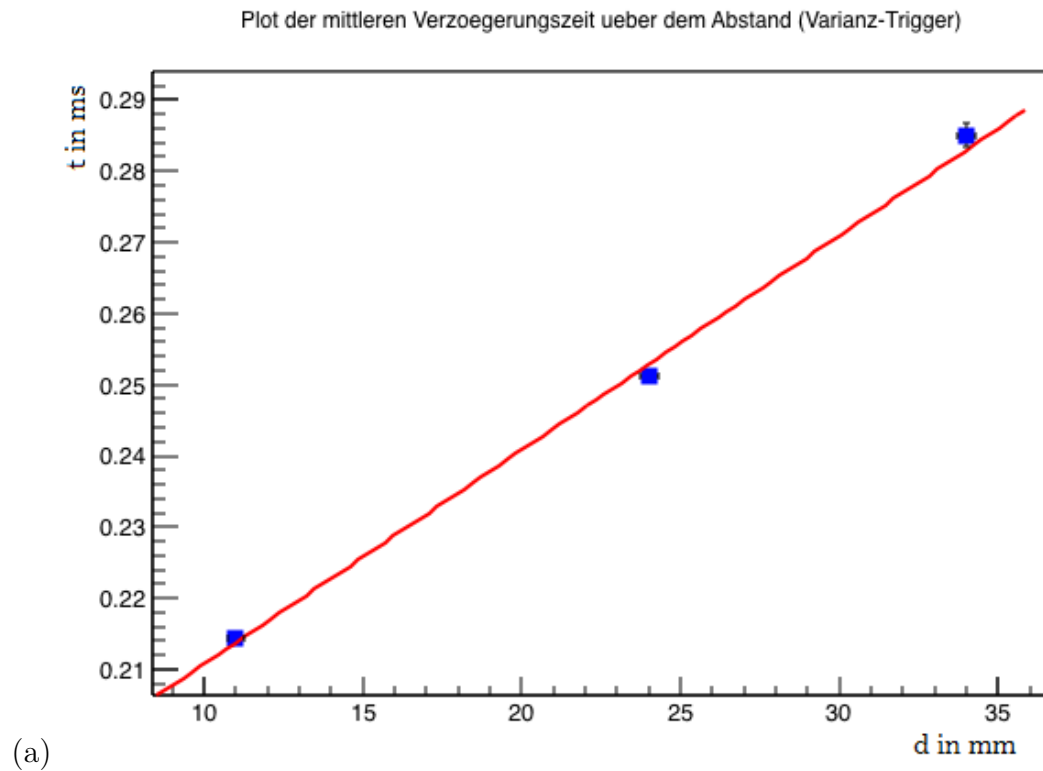
Die Standardabweichung (hier mit "RMS" titulierte) wird mit zunehmender Entfernung größer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Signale aus größerer Entfernung sich nicht so deutlich von Rauschen abheben und sich keine so klaren Anfangszeitpunkte ergeben, wie es bei kleineren Entfernungen der Fall ist.

### 6.1.2 Diskussion der Ergebnisse der FIR-Methode

Betrachtet wird nun Abbildung 23. Die Ergebnisse für  $d = 11mm$  und  $d = 24mm$  legen eine gaußähnliche Verteilung nahe, für  $d = 34mm$  erhält man wie ähnlich zur  $\sigma$ -Methode keine allzu schöne Verteilung. Dass die Anzahlen der Signale mit denen der  $\sigma$ -Methode übereinstimmen, ist nicht verwunderlich, da das Aussortieren schlechter Signale ein Teil der  $\sigma$ -Methode ist. Die Standardabweichung in (c) ist erwartungsgemäß groß, in (b) allerdings etwas kleiner als in (a), was aber im Rahmen statistischer Schwankungen eine ebenfalls zunehmende Tendenz vermuten lässt.

## 6.2 Die Schallgeschwindigkeit

Für einen Gesamtergebnisplot aller Messungen, bei denen die Schalllaufzeit bereits abgezogen ist, muss der Wert der Schallgeschwindigkeit bekannt sein. Dazu kann natürlich der Literaturwert verwendet werden. Ob dieser jedoch in diesem Fall als optimaler Wert angenommen werden darf, ist nicht klar. Die durchgeführten Messungen erlauben aufgrund der gemessenen Distanz und der sich ergebenden Mittelwerte für die Zeitverzögerung eine Messung der Schallgeschwindigkeit. Abbildung 24 zeigt einen linearen Fit durch die Messergebnisse einmal für die  $\sigma$ -Methode (a) und für die FIR-Methode (b).



**Abb. 24** Fit zur Messung der Schallgeschwindigkeit für das  $\sigma$ -Prinzip (a) und für das FIR-Prinzip (b)

Der Wert der Schallgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Inversen der Steigung, da hier die Zeit gegenüber dem Ort aufgetragen ist. Die Ergebnisse der Fits und die daraus resultierenden Werte für die Schallgeschwindigkeit zeigen Tabelle 4.

Triggerprinzip	Fitparameter für die Steigung	Schallgeschwindigkeit	Abweichung vom Literaturwert
$\sigma$ -Methode	$3,00833 \cdot 10^{-3} \pm 8,96870 \cdot 10^{-5}$	$332,41 \frac{m}{s} \pm 9,9 \frac{m}{s}$	3,1%
FIR-Methode	$3,21860 \cdot 10^{-3} \pm 1,01263 \cdot 10^{-4}$	$310,69 \frac{m}{s} \pm 9,8 \frac{m}{s}$	9,5%

**Tab. 4** Ergebnisse des Fits der Schallgeschwindigkeit

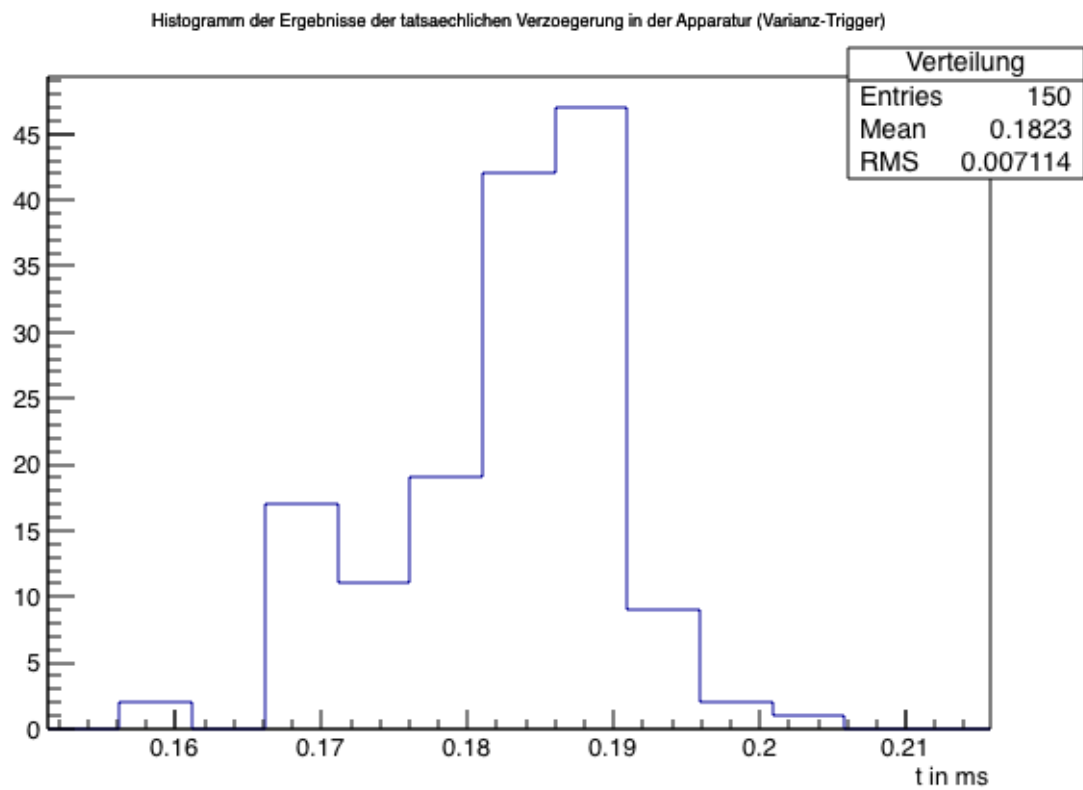
Das Ergebnis der  $\sigma$ -Methode kommt an den Literaturwert der Schallgeschwindigkeit in akzeptablen Abstand heran. Eventuell herrschen im Labor keine Normalbedingungen, sodass dieser Wert für  $v_{Schall}$  genommen werden könnte. Das Ergebnis des FIR-Fits liegt allerdings weit entfernt vom Literaturwert. Eine solch große Abweichung scheint auch bei leicht veränderten Bedingungen unwahrscheinlich. Außerdem ist es nicht konsistent, dass die beiden bestimmten Werte so weit auseinanderliegen, da zumindest die Messungen alle zu gleichen Bedingungen durchgeführt wurden.

In der weiteren Auswertung sind Ergebnisse für mehrere angenommene Werte für die Schallgeschwindigkeit dargestellt. Die  $\sigma$ -Methode und die FIR-Methode werden einmal mit dem Literaturwert von  $342,2 \frac{m}{s}$  ausgewertet, außerdem jede Methode noch einmal mit der für diese bestimmten Schallgeschwindigkeit. Die sich daraus ergebenden unterschiedlichen Ergebnisse für die Zeitverzögerung im System werden dabei als systematische Fehler gewertet.

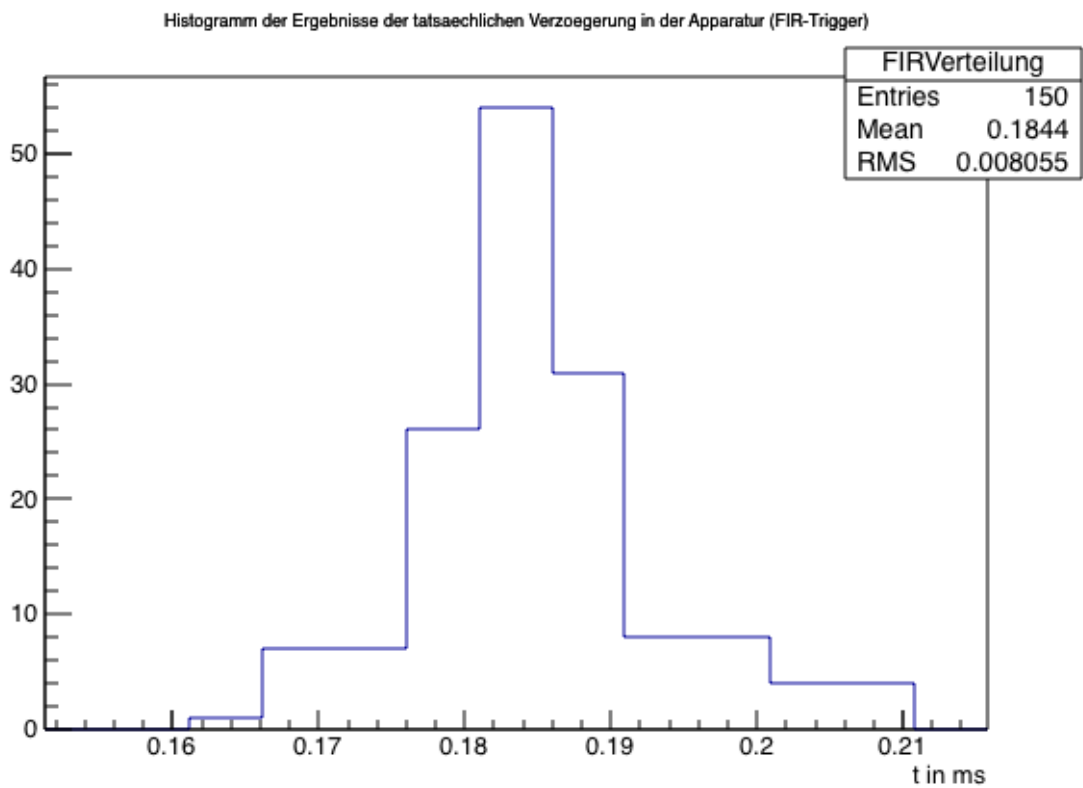
### 6.3 Ergebnisse für die Zeitverzögerung

Abbildung 25 zeigt die Verteilung der Messergebnisse der  $\sigma$ - und der FIR-Methode unter der Annahme, dass für die Schallgeschwindigkeit der Literaturwert verwendet werden kann. Dabei wurde für jedes gültige Messergebnis die Laufzeit des Schalls abgezogen, sodass alle Messergebnisse idealerweise den gleichen Wert besitzen sollten.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der  $\sigma$ -Methode benötigt es im Gegensatz zu den Ergebnissen des FIR-Prinzips schon ein bisschen Fantasie, eine gaußförmige Verteilung zu sehen. Auffällig ist hier vor allem ein zweiter kleiner Peak bei  $t \approx 0,17ms$ . Auch hieraus lässt sich ablesen, dass sich in der Mess- und Auswertemethodik einige systematischen Fehler aufaddieren. Positiv zu erwähnen ist dagegen, dass bei beiden Methoden etwa ein Drittel aller Messergebnisse den gleichen Wert besitzen. Interessant ist, dass die FIR-Verteilung ihren höchsten Peak eine Elementarzeit vor dem Maximum der  $\sigma$ -Triggerverteilung hat, der Mittelwert aber größer ist, was auf den zweiten Peak zu einem frühen Zeitpunkt in der  $\sigma$ -Verteilung zurückzuführen ist.

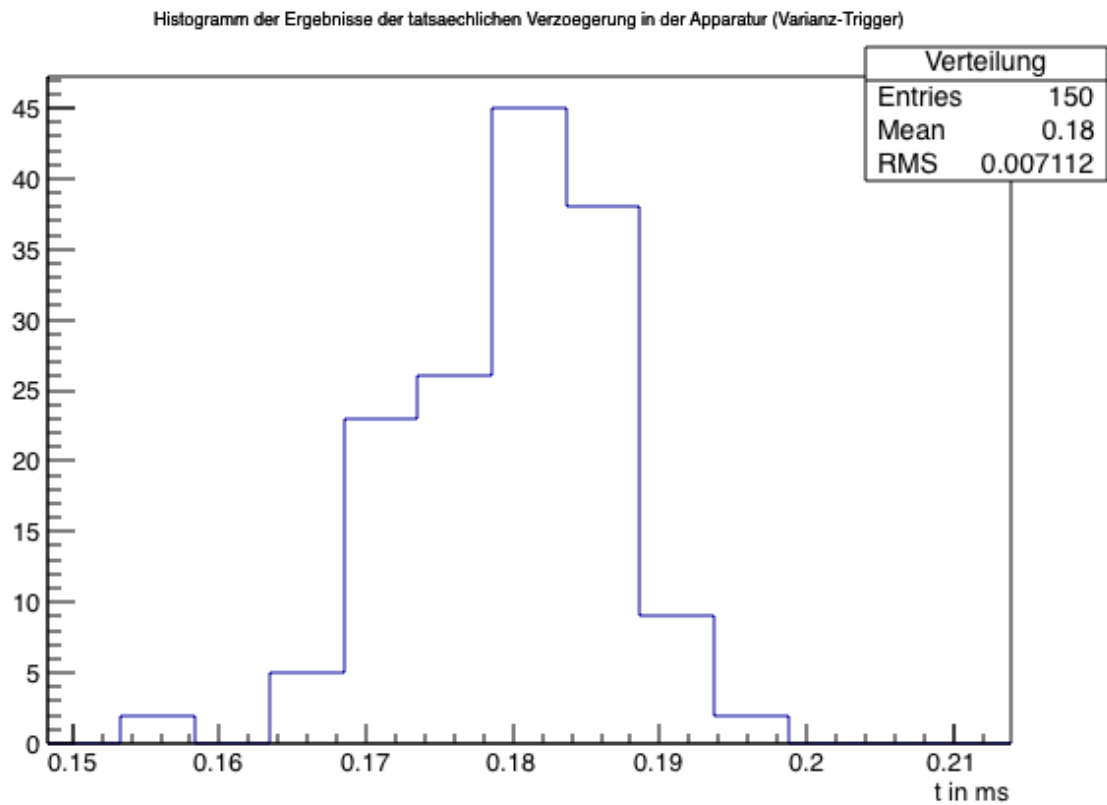


(a)

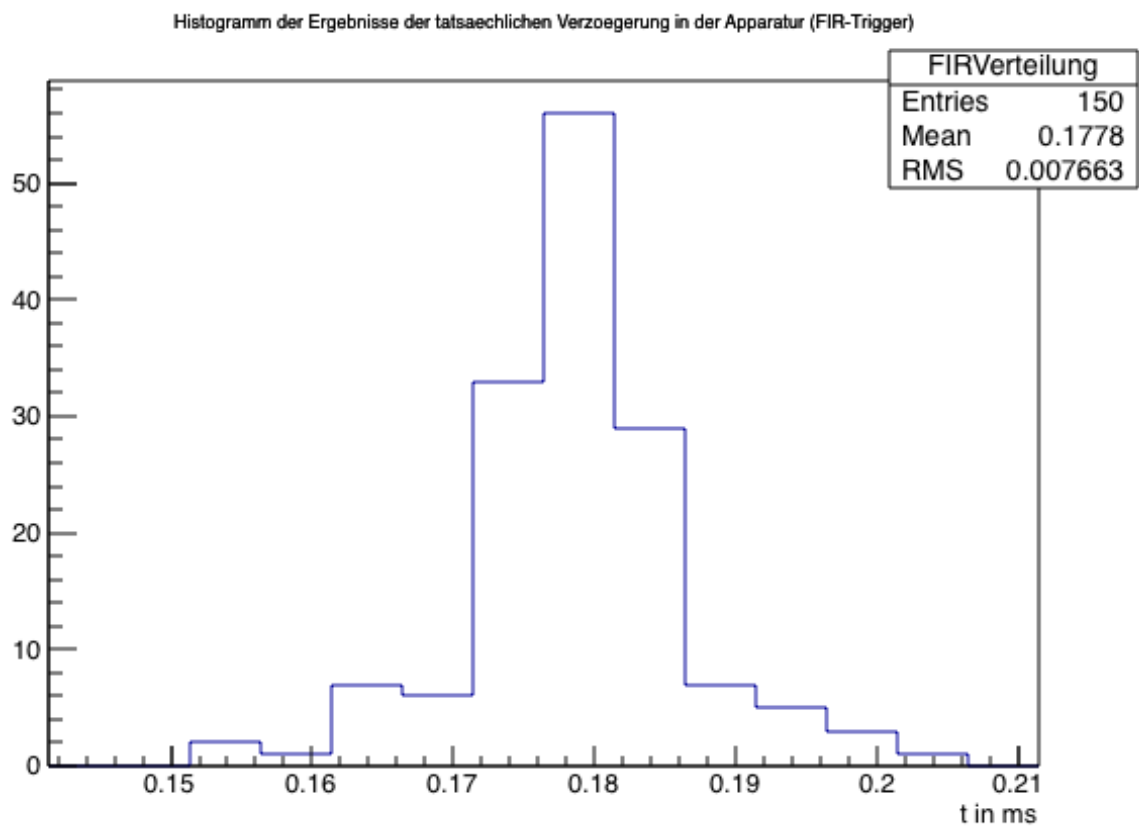


(b)

**Abb. 25** Gemessene endgültige Zeitverzögerung der (a)  $\sigma$ -Methode und der (b) FIR-Methode bei Benutzung der Literatur-Schallgeschwindigkeit



(a)



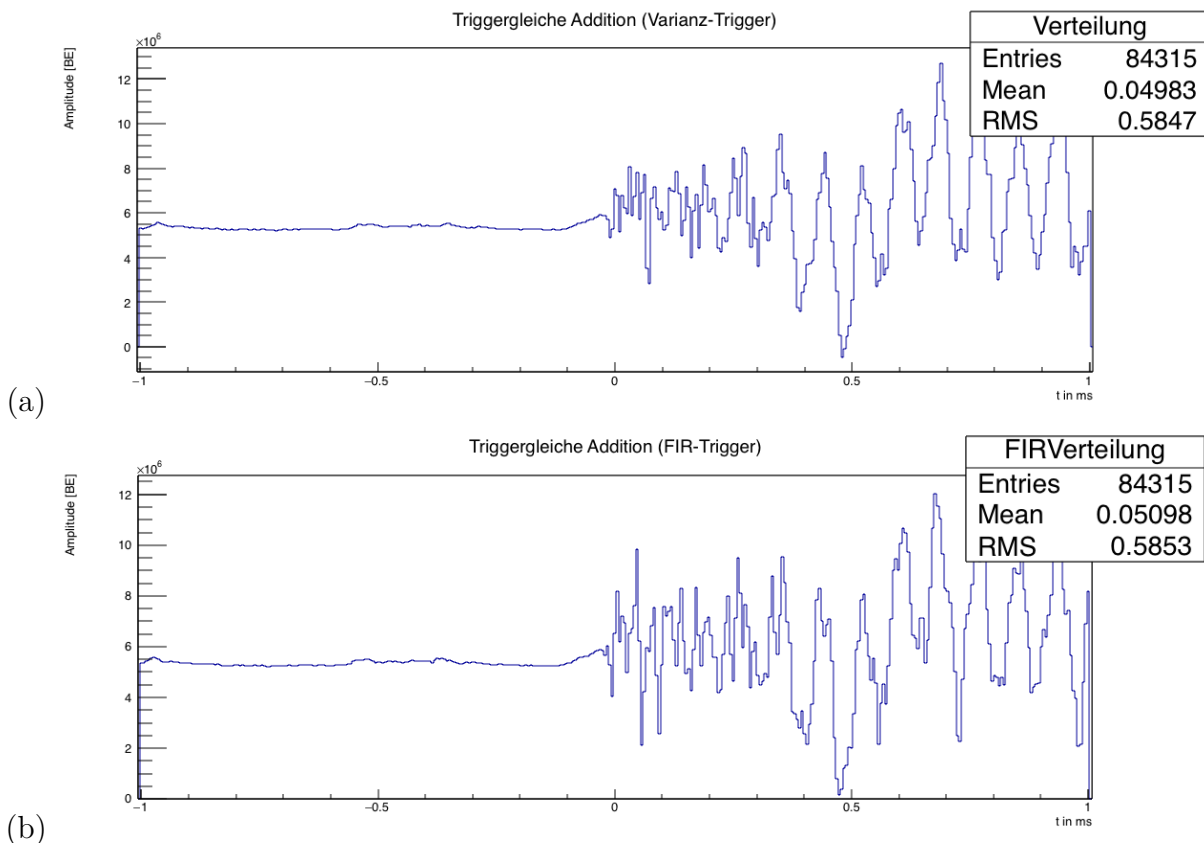
(b)

**Abb. 26** Gemessene endgültige Zeitverzögerung der (a)  $\sigma$ -Methode und der (b) FIR-Methode bei Benutzung der jeweiligen Fit-Schallgeschwindigkeit

In Abbildung 26 sind die Verteilungen unter Verwendung der für die jeweilige Methode bestimmte Schallgeschwindigkeit enthalten. Der zweite Peak in der  $\sigma$ -Methode verschwindet dabei, was ein Hinweis darauf ist, dass der  $\sigma$ -Fit-Wert der Schallgeschwindigkeit eventuell näher an der Realität ist als der Literaturwert. Die Standardabweichung ist bei beiden Methoden kleiner geworden, wenngleich die Unterschiede zu vorher nicht groß sind. Der Fehler auf die Schallgeschwindigkeit ist hier allerdings berücksichtigt, für detailliertere Ergebnisse siehe Kapitel 6.6. Um das Ergebnis nicht zu beschönigen wird der größere Fehler, der beim Literaturwert-Ergebnis entsteht, als statistischer Fehler angenommen.

## 6.4 Wo ist der tatsächliche Signalanfang?

Die Prinzipien, auf denen die Auswertungen beruhen, sind bekannt. Die  $\sigma$ -Methode löst bei Überschreiten des tatsächlichen Signals einer Schwelle relativ zum Rauschen aus, die FIR-Methode bei Überschreiten des gefilterten Signals einer Schwelle relativ zum nahe gelegenen Maximum. Aber wird mit diesen Methoden der tatsächliche Kontakt zwischen Klöppel und Klingel registriert oder nur ein Punkt, an dem das Signal deutlich zu erkennen ist? In mehreren Signalen, vor allem bei Benutzung der Klingel, die für die finale Messung benutzt wurde, sind schon vor dem Auslösezeitpunkt Signale erkennbar, die bei einzelner Betrachtung nicht als auffällig, bei Betrachtung und Vergleich mehrerer Signale aber doch als systematisch erscheinen. Dabei handelt es sich um eine über einen längerfristigen Zeitraum kleine Abhebung vom Rauschen, die ziemlich "glatt" erscheint. In Abbildung 27 wird das Phänomen untersucht.



**Abb. 27** Schon vor dem Auslösepunkt (hier der Nullpunkt) sind Abweichungen vom Rauschen erkennbar

Zu sehen ist hier eine Addition aller gültigen Signale derart, dass die jeweiligen Auslösezeitpunkte genau übereinander liegen. In dieser Abbildung wurde dieser Zeitpunkt als Nullpunkt gewählt. Rauschen und andere Fluktuationen sollten sich dadurch wegmitteln (eine Mittlung wäre es,

wenn der Wert der Amplitude noch durch die Anzahl der Signale geteilt werden würde). Erkennbar sind in beiden Fällen eindeutige nicht weggemittelte Signale. Ein sanftes Ansteigen des Signals, beginnend hier bei etwa  $t = -0,1ms$  bis unmittelbar vor dem Auslösepunkt und anschließend ein starker Abfall auf Normalhöhe oder sogar etwas niedriger. Gehört dieser Anstieg nun zum Signal und müssen demnach die Ergebnisse noch um einen konstanten Offset korrigiert werden? Das würde bedeuten, dass die Zeitverzögerung im System nur noch etwa  $0,08ms$  betragen würden. Tatsächlich kann man diese Theorie widerlegen: Wie des öfteren erwähnt, befindet sich im Octopus-board ein digitales Filter mit einer konstanten Zeitverzögerung. Diese wird vom Hersteller angegeben:

Table 6. Configuration with Default Filter

ICLK Frequency	Decimation Rate	Data State	Computation Delay	Filter Delay	SYNC to FILTER-SETTLE	Pass-Band Bandwidth	Output Data Rate (ODR)
20 MHz	64×	Fully filtered	2.25 $\mu s$	87.6 $\mu s$	$7122 \times t_{MCLK}$	125 kHz	312.5 kHz
20 MHz	128×	Fully filtered	3.1 $\mu s$	174 $\mu s$	$14217 \times t_{MCLK}$	62.5 kHz	156.25 kHz
20 MHz	256×	Fully filtered	4.65 $\mu s$	346.8 $\mu s$	$27895 \times t_{MCLK}$	31.25 kHz	78.125 kHz
12.288 MHz	64×	Fully filtered	3.66 $\mu s$	142.6 $\mu s$	$7122 \times t_{MCLK}$	76.8 kHz	192 kHz
12.288 MHz	128×	Fully filtered	5.05 $\mu s$	283.2 $\mu s$	$14217 \times t_{MCLK}$	38.4 kHz	96 kHz
12.288 MHz	256×	Fully filtered	7.57 $\mu s$	564.5 $\mu s$	$27895 \times t_{MCLK}$	19.2 kHz	48 kHz

Abb. 28 Übersicht über die Zeitverzögerungen, Tabelle entnommen aus [16]

Im Falle der "ICLK Frequency", was der Clock-Frequenz entspricht, interessiert hier die vorletzte Zeile, da die Clock-Frequenz im Experiment dem doppelten entspricht ergibt sich für die theoretische Verzögerung durch das Filter

$$\frac{5,05\mu s + 283,2\mu s}{2} = 144,125\mu s$$

Dieser Wert muss folglich die minimal mögliche Verzögerung sein. Dementsprechend kann der Anstieg nicht als Signalanfang gewertet werden und muss andere Ursachen haben, über die lediglich spekuliert werden kann. Eventuell ergibt sich durch das Anschlagen mit der Schraube bereits vor der Berührung eine niederfrequente Schwingung durch den Luftzug, oder es handelt sich um einen kapazitiven Effekt, eine elektrische Aufladung durch die Annäherung der Schraube an die Klingel. Dennoch ist eine systematische Vergrößerung der gemessenen Werte für die Zeitverzögerung wahrscheinlich, da ein Trigger immer erst ausgelöst werden kann, wenn das Signal bereits begonnen hat

## 6.5 Welche Methode ist besser?

Es ist naheliegend, dass man keine Pauschalantwort auf die Frage in der Überschrift finden kann. Beide verwendeten Triggermethoden bieten Argumente, als "besser" bezeichnet zu werden. Beim Blick auf die Fehler schneidet die  $\sigma$ -Triggermethode ein bisschen besser ab, außerdem liefert sie die Grundlage für die FIR-Methode, da hier das erste Maximum im Bereich um den  $\sigma$ -Trigger gesucht wird. Bei Betrachtung von Abbildung 27 fällt jedoch auf, dass der "Varianz-Trigger", wie der  $\sigma$ -Trigger hier genannt wird, kurz nach dem Auslösepunkt noch ziemlich stark "zappelt" und erst nach längerer Zeit eine Effektivschwindung erkennbar ist, beim FIR-Trigger ist das schon eher der Fall, das heißt, dass die Signalanfänge bei Verschiebung auf den gleichen Triggerzeitpunkt ähnlicher aussehen als beim  $\sigma$ -Trigger.

Zusammenfassend kann man beide Methoden als gleichwertig werten und erhält einen sinnvollen Wert für einen systematischen Fehler.

## 6.6 Quantitativer Überblick der Messergebnisse

Da diese experimentelle Bachelorarbeit das Ziel verfolgt, ein klares Ergebnis zu liefern, ist es sinnvoll, eine Zusammenfassung der Resultate aufzulisten. Als Wert für die Zeitverzögerung ergeben sich für die beiden verwendeten Methoden

Triggerprinzip	Mittelwert	Standardfehler
$\sigma$ -Trigger	0,1823ms	0,0071ms
FIR-Trigger	0,1844ms	0,0081ms

**Tab. 5** Messergebnisse beider Methoden mit statistischen Fehlern

Hier wird der Literaturwert der Schallgeschwindigkeit in Luft verwendet. Dieser wird mit  $v_{Schall} = 343,2 \frac{m}{s}$  angenommen. Es wurde bereits diskutiert, dass dieser Wert sicherlich nicht exakt der Realität entspricht.

Ein systematischer Fehler ergibt sich aus der Differenz der Mittelwerte der Benutzung der Literatur- und der Fit-Schallgeschwindigkeit

$$\Delta t_{\sigma, syst, v_{Schall}} = t_{\sigma, Literatur} - t_{\sigma, Fit} = 0,1823ms - 0,1800ms = 0,0023ms$$

$$\Delta t_{FIR, syst, v_{Schall}} = t_{FIR, Literatur} - t_{FIR, Fit} = 0,1844ms - 0,1778ms = 0,0066ms$$

Damit besitzen beide Methoden nun einen statistischen und einen systematischen Fehler, die sich quadratisch zu einem Gesamtfehler addieren [14]

$$\Delta t_{\sigma} = \sqrt{0,0071^2 + 0,0023^2}ms = 0,0075ms$$

$$\Delta t_{FIR} = \sqrt{0,0081^2 + 0,0066^2}ms = 0,0104ms$$

Schlussendlich kommt man zu einem finalen Ergebnis, wenn man als Zeitverzögerung den Mittelwert der  $\sigma$ - und der FIR-Methode nimmt

$$t = \frac{t_{\sigma} + t_{FIR}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (0,1823ms + 0,1844ms) = 0,1834ms$$

Mit einem Gesamtfehler, bestehend aus statistischen und systematischen Fehlern

$$\Delta t = \sqrt{\left(\frac{\partial t}{\partial t_{\sigma}} \Delta t_{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial t_{FIR}} \Delta t_{FIR}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \Delta t_{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \Delta t_{FIR}\right)^2} = 0,0064ms$$

In Wasser breitet sich Schall mit einer Geschwindigkeit von etwa  $1480 \frac{m}{s}$  aus [17], der Fehler entspricht also einer Unsicherheit auf die Teilchenposition von

$$\Delta x = v_{Schall, Wasser} \cdot 0,0064ms = 1480 \frac{mm}{ms} \cdot 0,0064ms = 9,47mm$$

Alternativ kann von einer der beiden Methoden der Mittelwert als Endergebnis verwendet werden und als zusätzlicher systematischer Fehler die Differenz der Mittelwerte beider Methoden

$$\Delta t_{syst, Methodik} = t_{FIR} - t_{\sigma} = 0,1844ms - 0,1823ms = 0,0021ms$$



## 7 Ausblick

Im Verlauf des Experiments sind immer wieder Phänomene aufgetaucht, die nicht sofort zu erklären waren und auch oft letztendlich nicht erklärt und genauer untersucht werden konnten. Dazu zählen einerseits die periodischen Zacken, die ja je nach Versuchsaufbau eine leicht andere Periode hatten, andererseits der Anstieg in den Signalen vor den tatsächlichen Auslösepunkten. Untersuchungen diesbezüglich wären natürlich eine sinnvolle Ergänzung zu dieser Arbeit, würden allerdings den Rahmen einer Bachelorarbeit sprengen. Dennoch sind gerade diese Phänomene Ursache, dass die Messergebnisse keine noch schöneren Werte geliefert haben. Würde man die Ursache der periodischen Zacken finden und eventuell diese sogar auslöschen oder abschwächen können, würde gerade bei großen Entfernungen die Statistik deutlich verbessert werden, da dann nicht mehr ein großer Prozentsatz der Signale wegen störenden Zacken in der Rauschzeit aussortiert werden müssten. Auch die vor dem Triggern auftretenden Anstiege der Signale bedürften einer genaueren Untersuchung, eventuell könnte in diesem Zusammenhang auch die Klingel optimiert werden. Allgemein trat die Erkenntnis auf, dass Klingeln, die ein höheres Frequenzspektrum besitzen, schönere Messergebnisse liefern. Letztlich kann man allerdings die Resultate der Messungen als in sich konsistent ansehen, die Messwerte haben gezeigt, dass sich der Wert der Verzögerung in einem erwarteten Rahmen befindet. Verbesserungen der Genauigkeit sind allerdings nach eben erwähnten Kriterien möglich.

# Abbildungsverzeichnis

1	Anordnung der Stränge des KM3NeT-Teleskops (links) und Position eines Hydrophon im DOM (rechts, Abbildung bearbeitet); Abbildungen entnommen aus [2] . . . . .	4
2	Das Neutrino reagiert über ein Z- (links) oder ein W-Boson (rechts). Feynman-Graphen erstellt auf feynman.aivazis [3] . . . . .	5
3	Eine mechanische Kraft führt zur Verschiebung der Ladungsschwerpunkte; Abbildung entnommen aus [7] . . . . .	6
4	Schematischer Aufbau, Einzelkomponenten werden in diesem Kapitel erklärt . .	7
5	Der Aufbau mit Klingel und Hydrophon. Die Schraube wird gegen die Klingel geschlagen. . . . .	8
6	(a) Foto der Schaltung und (b) ein qualitativer Schaltplan; Teile der Graphik entnommen aus [10] . . . . .	9
7	Ein rechteckiger Puls (a); Skala: horizontal $20 \frac{ms}{div}$ , vertikal $1 \frac{V}{div}$ . In (b) ist der Anstieg des elektrischen Signals im Detail zu sehen; Skala: horizontal $200 \frac{ns}{div}$ , vertikal $1 \frac{V}{div}$ . . . . .	11
8	Zwei Signale - (a) ein brauchbares Signal; (b) ein unbrauchbares Signal; die horizontale Achse zeigt die Zeit in $ms$ , die vertikale Achse die Amplitude in beliebigen Einheiten . . . . .	13
9	Ein Anschlag kann auch mehrere Trigger erzeugen. Skala: horizontal $20 \frac{ms}{div}$ , vertikal $1 \frac{V}{div}$ . . . . .	14
10	Detaillbereich eines Singnalanfangs . . . . .	14
11	Mittelwert und Triggerschwelle . . . . .	15
12	Eine zweite Triggerschwelle wird hinzugefügt . . . . .	16
13	Der kleinste Wert in den unteren beiden Diagrammen fällt aus der Reihe . . . .	17
14	Der plötzliche Peak führt zum verfrühten Auslösen . . . . .	18
15	Die Peaks treten periodisch auf . . . . .	18
16	Ein Peak in der Rauschzeit vergrößert die Standardabweichung und dadurch die Schwellwerte . . . . .	19
17	Das Schema eines FIR-Filters. Abbildung entnommen aus [12] . . . . .	20
18	Schematische Darstellung der gewünschten Einhüllenden (rot) . . . . .	21
19	Zwei Einhüllende mit Cut-Off-Frequenzen von (a) $f_G = 2kHz$ und (b) $f_G = 20kHz$	22
20	Überschreitet das gefilterte (rote) Signal einen bestimmten Bruchteil des Maximumwertes (graue horizontale Linie), schlägt der Trigger zu (graue vertikale Linie) . . . . .	23
21	Wie genau können die Positionen von Klingel und Hydrophon bestimmt werden?	24
22	Verteilungen der $\sigma$ -Methode aller Entfernungen. (a) $d = 11mm$ (b) $d = 24mm$ (c) $d = 34mm$ . . . . .	26
23	Verteilungen der FIR-Methode aller Entfernungen. (a) $d = 11mm$ (b) $d = 24mm$ (c) $d = 34mm$ . . . . .	27
24	Fit zur Messung der Schallgeschwindigkeit für das $\sigma$ -Prinzip (a) und für das FIR-Prinzip (b) . . . . .	29
25	Gemessene endgültige Zeitverzögerung der (a) $\sigma$ -Methode und der (b) FIR-Methode bei Benutzung der Literatur-Schallgeschwindigkeit . . . . .	31
26	Gemessene endgültige Zeitverzögerung der (a) $\sigma$ -Methode und der (b) FIR-Methode bei Benutzung der jeweiligen Fit-Schallgeschwindigkeit . . . . .	32
27	Schon vor dem Auslösepunkt (hier der Nullpunkt) sind Abweichungen vom Rauschen erkennbar . . . . .	33
28	Übersicht über die Zeitverzögerungen, Tabelle entnommen aus [16] . . . . .	34

# Literaturverzeichnis

- [1] Anton, Gisela: Welt der Physik, ANTARES und KM3NeT: Tiefsee-Neutrino-Teleskope  
<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/kosmische-neutrinos/tiefsee-neutrino-teleskope/>  
Erstellt: 16.02.2007, Stand: 31.08.2015
- [2] KM3NeT Homepage, <http://www.km3net.org/home.php>, Stand: 02.09.2015
- [3] Tool zur Erstellung von Feynman-Graphen <http://feynman.aivazis.com/> Stand: 31.08.2015
- [4] Matthias Brandt Bachelorarbeit "Aufbau und Test eines Wasser-Cherenkov-Detektors zur Demonstration kosmischer Strahlung", [http://www.uni-muenster.de/Physik.KP/AGWeinheimer/Files/theses/Bachelor\\_Matthias\\_Brandt.pdf](http://www.uni-muenster.de/Physik.KP/AGWeinheimer/Files/theses/Bachelor_Matthias_Brandt.pdf), 07.09.2010, Stand: 31.08.2015
- [5] Scherl, Bernhard: Untersuchungen zur Positionskalibrierung mit einem neuartigen piezoelektrischen Element für KM3NeT, Masterarbeit aus der Physik, 17.09.2014, <http://www.ecap.physik.uni-erlangen.de/publications.shtml>, Stand: 03.09.2015
- [6] Karl, Robert: Characterization and Analysis of Acoustical Sensor Devices for KM3NeT and ANTARES, Masterarbeit aus der Physik, 28.03.2013, <http://www.ecap.physik.uni-erlangen.de/publications.shtml>, Stand: 03.09.2015
- [7] BR-Wissen, Piezoeffekt - Strom unter Druck, Erstellt: 22.05.2012, <http://www.br.de/themen/wissen/piezoeffekt104.html>, Stand: 01.09.2015
- [8] Private Kommunikation mit R.Lahmann, ECAP
- [9] ROOT, A data analysis framework - Cern, Version 5, <https://root.cern.ch/>
- [10] Texas Instruments, Datasheet NE555P, September 1973 - Revised September 2014, [www.ti.com](http://www.ti.com), Stand: 13.08.2015
- [11] Texas Instruments, Datasheet SN54128, SN74128, December 1983 - Revised March 1988, [www.ti.com](http://www.ti.com), Stand: 13.08.2015
- [12] FH Schmalkalden, PDF Realisierung digitaler Filter in C, 19.11.2009, Stand: 17.08.2015
- [13] Matlab, <http://de.mathworks.com>
- [14] Bernhard, R., FP Einführungsvortrag, SS 2011, Berechnung von Fehlern, [http://hacol13.physik.uni-freiburg.de/fp/fp2013-2/Kap\\_04.pdf](http://hacol13.physik.uni-freiburg.de/fp/fp2013-2/Kap_04.pdf), Stand: 04.09.2015
- [15] Bundesverband Geothermie, Lexikon der Geothermie, <http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossar-lexikon/s/schallgeschwindigkeit.html>  
Stand: 03.09.2015
- [16] Analog Devices, Datasheet AD7764, 2007-2009 <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7764.pdf>, Stand: 04.09.2015
- [17] Planet Schule, Schallgeschwindigkeit in Luft und Wasser, <https://www.planet-schule.de/sf/multimedia-interaktive-animationen-detail.php?projekt=was> Stand: 04.09.2015

## Tabellenverzeichnis

1	Wahrheitstafel des NOR-Gatters . . . . .	10
2	Für die Messung verwendete Schwellwerte für die $\sigma$ -Methode . . . . .	25
3	Für die Messung verwendete Schwellwerte für die FIR-Methode . . . . .	25
4	Ergebnisse des Fits der Schallgeschwindigkeit . . . . .	30
5	Messergebnisse beider Methoden mit statistischen Fehlern . . . . .	35

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbst verfasst habe. Es wurden nur die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt.

---

Ort, Datum

Andreas Zmija