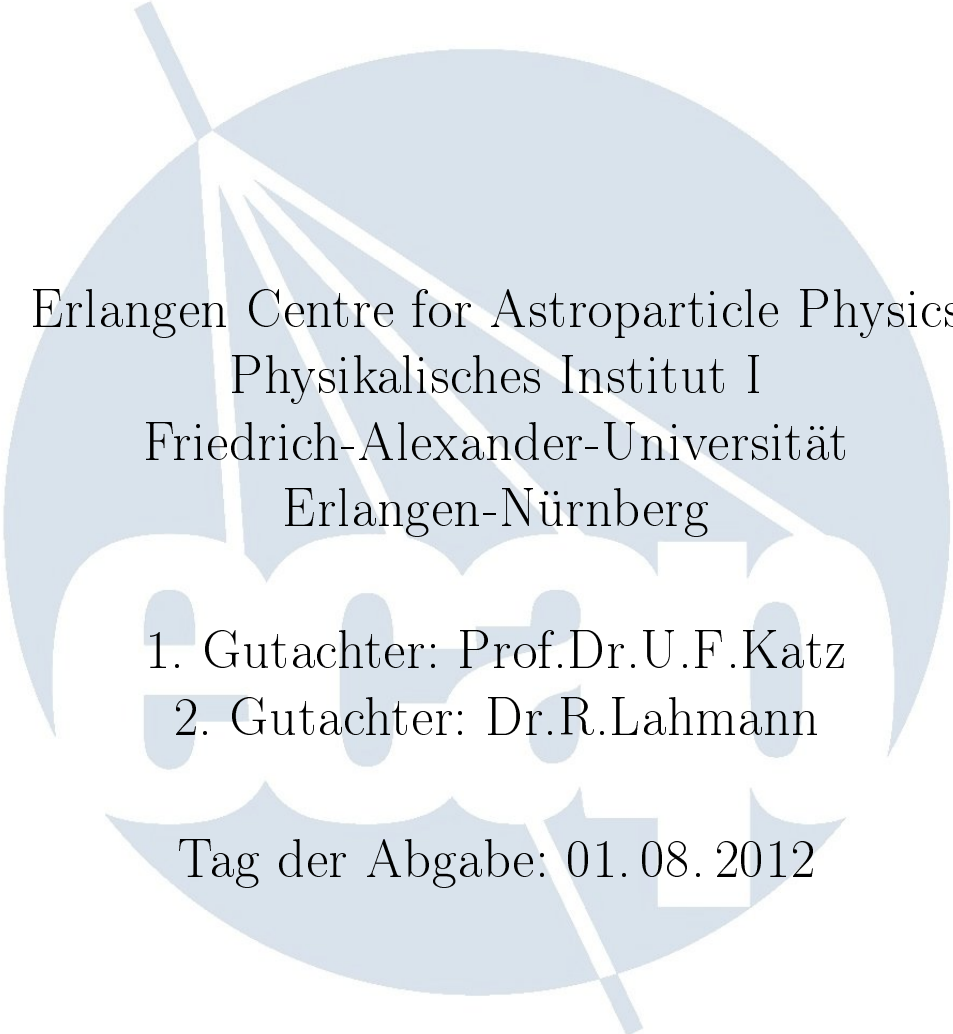


Kalibration piezo-akustischer Sensoren für KM3NeT

Bachelorarbeit

vorgelegt von
Stefan Pickel



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

1. Gutachter: Prof.Dr.U.F.Katz
2. Gutachter: Dr.R.Lahmann

Tag der Abgabe: 01.08.2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Hintergrund	4
2.1	KM3NeT	5
2.2	Akustische Teilchendetektion	6
2.3	Piezokeramiken	8
3	Charakterisierung des Piezos	10
3.1	Messanordnung und Herleitung der Formeln	11
3.2	Auswertung	13
3.3	Überprüfung der Ergebnisse	18
4	Ausblick	20

Kapitel 1

Einleitung

Im Mittelmeer soll mit KM3NeT ein neues Neutrinoobservatorium entstehen, das die südliche Hemisphäre nach Quellen hochenergetischer Neutrinos absuchen soll.

Derzeit werden die einzelnen Sensoren und Schaltungen, die in den DOMs eingesetzt werden sollen, an verschiedenen Instituten untersucht und kalibriert, um eine Grundlage für die Auswertung der Daten zu schaffen, die sie liefern werden. Wichtig sind hier vor allem die verwendeten Photomultiplier, aber auch Verstärkerschaltkreise und akustische Sensoren müssen ausführlich getestet werden.

In dieser Arbeit wird das Frequenzverhalten einer Piezokeramik untersucht und eine Kalibrationskurve für sie erstellt. Piezos dieses Typs sollen als akustische Sensoren in KM3NeT verwendet werden. Ihr hauptsächlichster Verwendungszweck wird darin bestehen, die Position der einzelnen Sensoren des Detektors genau festzustellen, die sich durch die Strömungen unter Wasser ständig verändern.

Daneben sollen sie jedoch auch genutzt werden, die Möglichkeiten der akustischen Teilchendetektion für zukünftige Neutrinoobservatorien zu erproben.

Kapitel 2

Hintergrund

Eine der Eigenschaften, die Neutrinos für die Physik und die Astrophysik interessant machen, erschwert zugleich ihren Nachweis. Sie unterliegen nur der schwachen Wechselwirkung und haben deswegen einen sehr kleinen Wirkungsquerschnitt. Dadurch erlauben sie uns einen tieferen Blick in das Universum als andere Teilchen, treten jedoch auch im Detektor selten in Wechselwirkung mit anderen Teilchen. Bei großen Energien sind zudem, wie bei allen Bestandteilen der kosmischen Strahlung, nur noch geringe Flüsse zu erwarten.

Um möglichst viele Reaktionen von Neutrinos zu erfassen, müssen große Volumina mit Sensoren überwacht werden. Heutige Neutrinoobservatorien verwenden hierfür Photomultiplier, die das Cherenkovlicht der von Neutrinos ausgelösten Sekundärteilchen registrieren. Aus den aufgezeichneten Ankunftszeiten und Signalamplituden mehrerer Photomultiplier kann auf Energie und Bewegungsrichtung der einfallenden Neutrinos rückgeschlossen werden.

Durch die empfindlichen Photomultiplier und die geringe Lichtausbeute der Cherenkovblitze funktionieren diese Teleskope nur in dunklen Umgebungen. Zudem benötigt man eine gute Abschirmung gegen die kosmische Strahlung, um Untergrund aus dieser Teilchenquelle zu unterdrücken.

Einige Detektoren befinden sich deswegen unterirdisch und verwenden große Tanks mit geeignetem Detektormaterial, zum Beispiel Kamiokande (Kamioka Nucleon Decay Experiment, ursprünglich dazu gedacht, den Protonenzerfall nachzuweisen) [10] in der Kamioka-Mine in Japan und das Nachfolgeexperiment Super-Kamiokande [11], das Neutrinos im GeV-Bereich aufspüren kann.

Ein anderes System nutzen AMANDA (Antarctic Muon and Neutrino Detector Array) und IceCube in der Antarktis. Sie bestehen aus einzelnen Photomultiplier-Modulen, die an langen Strings zwischen 1.5 und 2.5 km ins Eis eingelassen werden, wobei die IceCube um das AMANDA-Experiment herum errichtet wurde. IceCube füllt ein Volumen von 1 km^3 aus und erfasst Neutrinos mit Energien im TeV- und PeV-Bereich. Das klare Eis ist als Detektormaterial gut geeignet und bietet zugleich eine gute Abschirmung gegen Myonen.

Ein ähnliches Layout wie IceCube und AMANDA hat das Neutrinoobservatorium ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) [6]. Es befindet sich im Mittelmeer, 30 km vor der Küste von Toulon, Südfrankreich, in 2.5 km Tiefe und besteht aus 12 Strings, verteilt auf 0.1 km^2 , mit optischen Sensoren und einer zusätzlichen Instrumentation Line, die die Umgebung überwacht und Daten für die Kalibration aufzeichnet. ANTARES erfasst Neutrinos mit Energien $> 10 \text{ GeV}$.

2.1 KM3NeT

Das geplante Neutrinoobservatorium KM3NeT soll im Mittelmeer ein Volumen von mehreren Kubikkilometern zur Detektion von Neutrinos verwenden. Das finale Design steht noch nicht fest, es sollen jedoch viele Erfahrungen aus den Pilotprojekten ANTARES, NEMO (Neutrino Mediterranean Observatory) und NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research) berücksichtigt werden.

Ein Kernelement von KM3NeT sind die DOMs (Digital Optical Module) (s. Abb. 2.1). Dabei handelt es sich um Glaskugeln, in denen alle wesentlichen Sensoren enthalten sein sollen:

- 31 Photomultiplier mit 3 Zoll Durchmesser,
- Kompass
- Neigungsmesser
- optische Kalibrationsquelle
- akustischer Piezo-Sensor

Die Ausleseelektronik der Sensoren ist ebenfalls integriert, wodurch weniger Kabelführungen in die DOMs nötig sind und strukturelle Schwächen auf ein Minimum reduziert werden. Zusammengehalten werden die beiden Halbkugeln, aus denen die DOMs bestehen, allein durch den Wasserdruck.

Die DOMs sollen auf mehrere hundert Meter langen DUs (detection unit), die am Meeresgrund verankert werden im Wasser treiben.



Abbildung 2.1: *Hälfte eines DOM-Prototyps mit Photomultipliern und Auslesekarte*

2.2 Akustische Teilchendetektion

Neben dem derzeit verwendeten Nachweis von Cherenkovlicht wird für hochenergetische Neutrinos (Energien ab etwa 10^{17} eV) eine weite Möglichkeit der Detektion untersucht. Sie können mit Nukleonen oder Atomkernen in Wechselwirkung treten und einen Teilchenschauer auslösen. Bei ausreichender Energie kann dieser charakteristische akustische Signale erzeugen, die mit geeigneten Sensoren gemessen werden können.

Vereinfacht kann dies durch eine Erwärmung des Wassers beschrieben werden, die eine starke Kompression und anschließende Dekompression zur Folge hat, wenn sich das erhitzte Wasser zunächst beschleunigt und anschließend verlangsamt ausbreitet. Daraus resultiert ein bipolares Signal (s. Abb. 2.2) bei dem der Druck zunächst ansteigt und dann in ähnlicher Stärke unter den Ursprungswert abfällt.

Dieses Signal breitet sich aufgrund der näherungsweise zylinderförmigen Quelle hauptsächlich in einer Ebene senkrecht zur Einfallsrichtung des Neutrinos aus. Man spricht von einer Schallscheibe. Aus den Ankunftszeiten des Signals bei verschiedenen Sensoren kann die Scheibe rekonstruiert werden. Auf diese Weise lässt sich die Gerade feststellen, auf der sich das Neutrino bewegt hat, nicht jedoch seine Bewegungsrichtung. Eine genauere Beschreibung der beteiligten Mechanismen findet sich zum Beispiel in [2]. Da die Abschwächlänge von Schall in Wasser deutlich größer ist als die von Licht bietet die Ausrüstung eines Neutrinoobservatoriums mit entsprechenden Sensoren die Möglichkeit, das effektive Detektorvolumen für sehr hochenergetische Schauer deutlich zu vergrößern.

Durch Experimente mit gepulsten Protonenstrahlen und Lasern wurden bereits erfolgreich Neutrinoereignisse mit Energien im Bereich von 1 EeV simuliert [3]. Eine Anwendung zur Teilchendetektion erfolgt derzeit noch nicht.

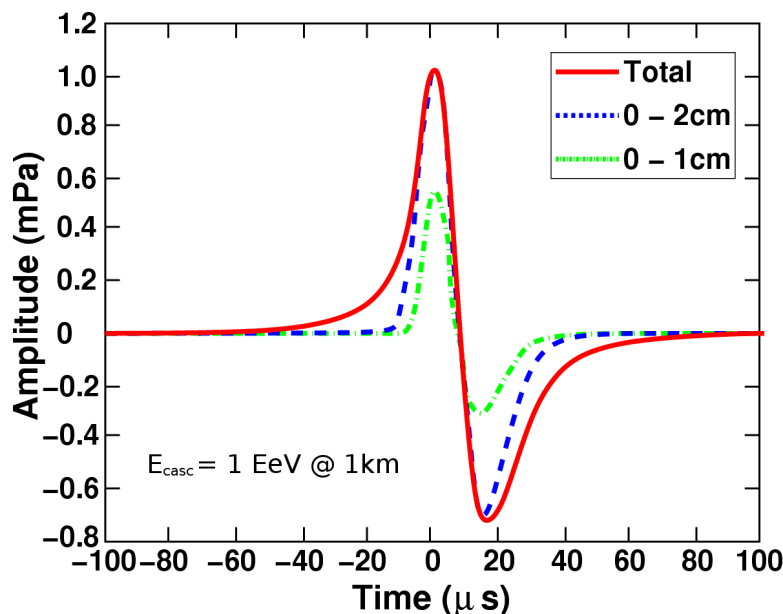


Abbildung 2.2: Simuliertes Signal eines hadronischen Schauers mit 10^{18} eV in 1 km Entfernung. Die gestrichelten Linien zeigen den Anteil am Signal, der in 1 cm (grün) bzw. 2 cm um den Schauer erzeugt wird [4]

In ANTARES integriert ist AMADEUS (ANTARES Modules for Acoustic Detection under the Sea), eine Anordnung von 36 Hydrophonen, aufgeteilt auf 6 Stockwerke. Davon befinden sich jeweils drei auf der Instrumentation Line und auf einem zusätzlichen Strang.

Mit AMADEUS wird derzeit eine Machbarkeitsstudie zur Nutzung der akustischen Teilchende-

tektion im Rahmen eines größeren Neutrinooteleskops durchgeführt. Besonders wichtig ist die Untersuchung des akustischen Hintergrunds. Da sich Schall in Wasser sehr weit ausbreitet tragen hierzu viele Quellen bei, sowohl künstliche, zum Beispiel Schiffsantriebe, als auch natürliche wie Wale und Delfine. Dadurch ergibt sich bereits für den Untergrund ein breites Frequenzspektrum und nur wenn dieses gut verstanden ist können die Neutrinosignale zuverlässig erkannt werden.

Die piezoelektronischen Sensoren von KM3NeT sind primär zur Positionsbestimmung der einzelnen DOMs nötig, die ihre Position durch den flexiblen Aufbau und die Meeresströmungen verändern. Hierzu soll in regelmäßigen Abständen ein Peilsignal von einer festgelegten Stelle ausgesandt werden, mit dessen Hilfe die Lage der einzelnen DOMs zueinander und zum Signalgeber festgestellt werden kann. Für die Rekonstruktion der gemessenen Ereignisse ist die Kenntnis der Position der einzelnen Sensoren zum Zeitpunkt der Detektion entscheidend. Ein ähnliches System wird bei ANTARES bereits erfolgreich eingesetzt.

Neben dieser Verwendung soll mit den akustischen Sensoren jedoch auch überprüft werden, ob bei den im Meer herrschenden Bedingungen akustische Teilchendetektion möglich ist.

2.3 Piezokeramiken

Durch mechanische Verformung können bei manchen Kristallen zwischen gegenüberliegenden Seiten elektrische Spannungen auftreten. Der zugrunde liegende piezoelektrische Effekt beruht auf der Verschiebung der Polarisation mancher Materialien, wenn mechanisch Druck auf sie ausgeübt wird. Der Effekt wird oft angewandt, zum Beispiel in elektrischen Schaltkreisen, aber auch als Sensor für Druckmessungen oder in Mikrofonen und Hydrophonen.

Industriell hergestellte Piezos sind oft Keramiken aus ferroelektrischen Grundwerkstoffen, die bei großer Hitze durch Anlegen eines elektrischen Feldes polarisiert werden. Dies geschieht durch Ausrichtung der zunächst zufällig verteilten Dipolmomente in der Keramik entlang des elektrischen Feldes. Die Seiten senkrecht zur Polarisationsachse können mit einer leitenden Schicht beschichtet werden um als Elektroden zu dienen.

Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften eines Piezos sind miteinander gekoppelt. Harmonische Anregung durch eine angelegte Wechselspannung führt dazu, dass der Piezo schwingt, umgekehrt führt eine mechanische Schwingung des Piezos zur Ausbildung einer Spannung an den Elektroden. In einem Schaltkreis zeigt ein Piezo bei niedrigen Frequenzen dasselbe Verhalten wie ein Kondensator. Bei hohen Frequenzen ist das Verhalten jedoch durch innere Reibung und Trägheit dominiert, wodurch die Schwingung dem Eingangssignal mit einer Phasenverschiebung von π folgt. Ein Verhalten, das einer Induktivität entspricht. Das genaue Frequenzverhalten wird durch die Geometrie des Piezos bestimmt, aus der sich die mechanischen Schwingungsmoden ergeben, die zu einer Vielzahl von Resonanzen und Antiresonanzen führen.

Dieses Verhalten kann durch ein Ersatzschaltbild beschrieben werden (s. Abb. 2.3), das aus einer

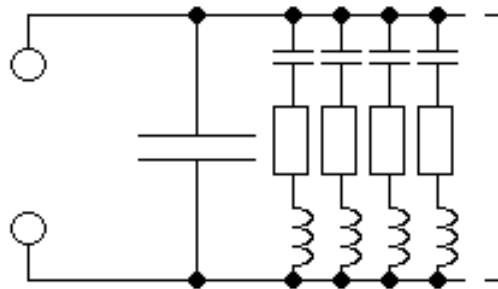


Abbildung 2.3: Elektrisches Ersatzschaltbild für eine Piezokeramik

Kapazität (Im späteren Verlauf als C_P bezeichnet) und dazu parallel geschalteten LRC -Gliedern besteht ($C_k, L_k, R_k, k = 1, 2, \dots$). Jedes LRC -Element stellt hierbei eine Resonanzmode dar, ihre genaue Anzahl ist also durch die Geometrie des Piezos bestimmt.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die elektrischen Größen dieses Schaltbildes nur bedingt mechanischen Eigenschaften der Keramik entsprechen und daher weniger als tatsächliche, physikalische Eigenschaften sondern nur als Modellparameter betrachtet werden sollten. Die Antiresonanzen können als Wechselwirkung eines LRC -Elements mit C_P und den anderen LRC -Gliedern aufgefasst werden.

Ausgehend von diesem Ersatzschaltbild lässt sich die Impedanz eines Piezos in einem elektrischen Schaltkreis durch die folgenden Formeln beschreiben:

$$Z_{Piezo} = \frac{1}{Z_C^{-1} + \sum_k^n Z_{LRC,k}^{-1}}$$

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C_P} \quad (2.1)$$

$$Z_{LRC,k} = R_k + i\omega L_k + \frac{1}{i\omega C_k} \quad (2.2)$$

, wobei $k = 1, 2, 3, \dots$ jeweils für eine Resonanz steht. Aus diesen Größen können die Resonanz- und Antiresonanzfrequenzen berechnet werden.

$$f_{res,k} \approx \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} \quad (2.3)$$

$$f_{anti,k} \approx \frac{1}{\sqrt{L_k \frac{C'_P C_k}{C'_P + C_k}}} \quad (2.4)$$

wobei

$$C'_P := C_P + \sum_{j=k+1}^n C_j$$

die Summe von C_P und den Kapazitäten der folgenden LRC -Glieder ist.

Kapitel 3

Charakterisierung des Piezos

Der akustische Sensor von KM3NeT wird Piezos vom selben Typ enthalten, wie der in dieser Arbeit untersuchte. Dieser wird zusammen mit einem ersten Vorverstärker in einem Hohlzylinder an der Innenseite der Glaskugeln festgeklebt. Die festgeklebte Seite wird im weiteren Verlauf als Unterseite des Piezos angenommen. Auf die Kuppel treffende Schallwellen werden auf diese übertragen und regen auch den Piezo zum schwingen an. Die dadurch auftretende Spannung zwischen der Ober- und Unterseite des Piezos wird abgegriffen und durch den Vorverstärker und einen darauf folgenden Verstärker in die Ausleseelektronik des DOMs übertragen.

Um aus dem in der Messelektronik aufgezeichneten Spannungssignal auf die ursprünglichen Schallwellen zu schließen ist ein gutes Verständnis des Frequenzverhaltens aller Bauteile notwendig, also die Kenntnis der Abhängigkeit der Verstärkung (oder, im Fall des Piezos, Abschwächung) und Phasenverschiebung von der Frequenz. Damit wird in der Regel das zu erwartende Ausgangssignal für ein bekanntes Eingangssignal errechnet. Dies geschieht, indem das Eingangssignal in den Frequenzraum fouriertransformiert wird. Dort können Amplitude und Phase mit den entsprechenden Funktionen Multipliziert werden. Nach der anschließenden Rücktransformation erhält man das gewünschte Ausgangssignal.

Da das Frequenzverhalten hintereinander geschalteter Schaltkreise sehr komplex werden kann, werden zunächst die einzelnen Bestandteile untersucht. Die Gesamtschaltung kann dann als Hintereinanderausführung der einzelnen Schaltungen genähert werden. treten stärkere Wechselwirkungen der Bauteile untereinander auf als zunächst angenommen, so können diese als Interaktionsterme in die Berechnung mitaufgenommen werden, da sich das Verhalten der einzelnen Teile nicht grundlegend ändert.

3.1 Messanordnung und Herleitung der Formeln

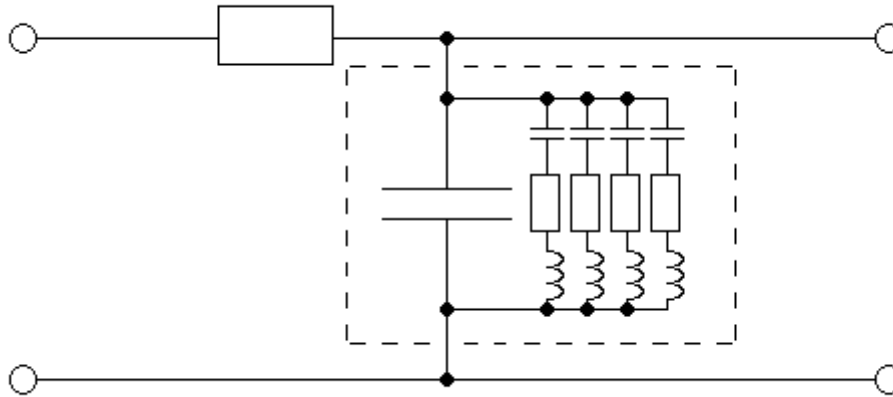


Abbildung 3.1: Schaltbild der Messanordnung mit separat eingezeichnetem Piezo

Für die Messung wurde das Piezo an Ober- und Unterseite mit Kontakten versehen, wie es auch für den fertigen Sensor gedacht ist. Angeregt wurde der Piezo über einen $10\text{ k}\Omega$ -Widerstand durch einen Funktionsgenerator. Als Eingangssignal wurden Sinusschwingungen mit einer festen Amplitude von 6 V_{pp} und ohne Offset. Die Frequenz wurde im Verlauf der Messreihen zwischen 25 Hz und 1 MHz gewählt. Aufgezeichnet wurde jeweils die Mittlung über 1000 Einzelmessungen, wodurch die Fehler durch statistisches Rauschen klein gehalten wurden.

Das am Piezo abgegriffene Signal wurde in einem Oszilloskop aufgezeichnet, ebenso das Ausgangssignal, das vom Funktionsgenerator abgegeben wurde. Dadurch ergibt sich zunächst das in Abbildung 3.1 gezeigte Schaltbild, in dem die Piezokeramik als separate Einheit eingezeichnet ist. Dieses lässt sich auch durch das in Abbildung 3.2 dargestellte, äquivalente Schaltbild darstellen. Auf Grundlage dieses Schaltbildes wurden die Funktionen $\frac{U_{out}}{U_{in}}(f)$ für den Amplitudenverlauf und $\varphi(f)$ für den Phasenverlauf hergeleitet.

Zunächst kann davon ausgegangen werden, dass jeder Strom, der durch den Vorwiderstand fließt gleich stark ist wie der Strom durch den gesamten Schaltkreis.

$$I_{in} = \frac{U_{in}}{Z_{in}} = \frac{U_{out}}{Z_{out}} = I_{out}$$

mit U_{in} als Eingangsspannung vom Funktionsgenerator und U_{out} der Ausgangsspannung nach dem Piezo. Z_{in} ist die Impedanz des Gesamtschaltkreises, also

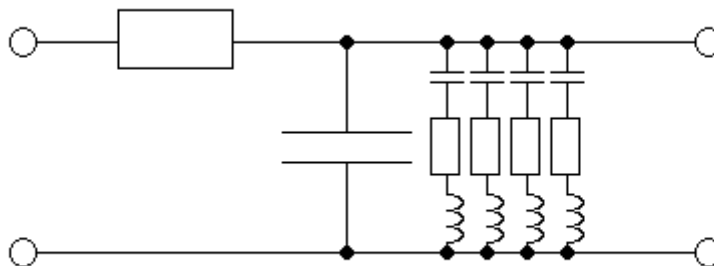


Abbildung 3.2: Schaltbild der Messanordnung, Piezo integriert

$$Z_{in} = Z_{ges} = Z_R + Z_{Piezo}$$

während $Z_{out} = Z_{Piezo}$ gilt. Für das Amplitudenverhältnis ergibt sich also

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{|Z_{Piezo}|}{|Z_R + Z_{Piezo}|}$$

Die Phasenverschiebung ergibt sich mit

$$\varphi = \arctan \frac{\operatorname{Im}(Z_{ges})}{\operatorname{Re}(Z_{ges})}$$

Z_{Piezo} wird entsprechend der bereits hergeleiteten Formel bestimmt, wobei die Impedanzen $Z_{LRC,k}$ der LRC -Glieder für die Berechnung in Real- und Imaginärteil aufgeteilt wurden:

$$\operatorname{Re}(Z_{LRC,k}^{-1}) = \frac{R_k}{\left(L_k\omega - \frac{1}{C_k\omega}\right) + R_k^2} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{Im}(Z_{LRC,k}^{-1}) = \frac{1}{C_k\omega \left(\left(L_k\omega - \frac{1}{C_k\omega}\right) + R_k^2\right)} - \frac{1}{\left(L_k\omega - \frac{1}{C_k\omega}\right) + R_k^2} \quad (3.2)$$

Hierbei ist $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz. Dadurch ergibt sich:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{(\operatorname{Re}_Z (\operatorname{Re}_Z + R ((\operatorname{Re}_Z)^2 + (\operatorname{Im}_Z)^2)) + (\operatorname{Im}_Z)^2)^2 + (\operatorname{Im}_Z)^2}{\left((\operatorname{Re}_Z + R ((\operatorname{Re}_Z)^2 + (\operatorname{Im}_Z)^2))^2 + (\operatorname{Im}_Z)^2\right)^2} \quad (3.3)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\operatorname{Im}_Z}{\operatorname{Re}_Z (\operatorname{Re}_Z + R ((\operatorname{Re}_Z)^2 + (\operatorname{Im}_Z)^2)) + (\operatorname{Im}_Z)^2} \quad (3.4)$$

Mit Re_Z und Im_Z als verkürzte Schreibweisen für den Real- und Imaginärteil von $(Z_{Piezo})^{-1}$:

$$\operatorname{Re}_Z := \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{\left(L_k\omega - \frac{1}{C_k\omega}\right) + R_k^2}$$

$$\operatorname{Im}_Z := -\frac{1}{\omega C_P} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k\omega \left(\left(L_k\omega - \frac{1}{C_k\omega}\right) + R_k^2\right)} - \frac{1}{\left(L_k\omega - \frac{1}{C_k\omega}\right) + R_k^2}$$

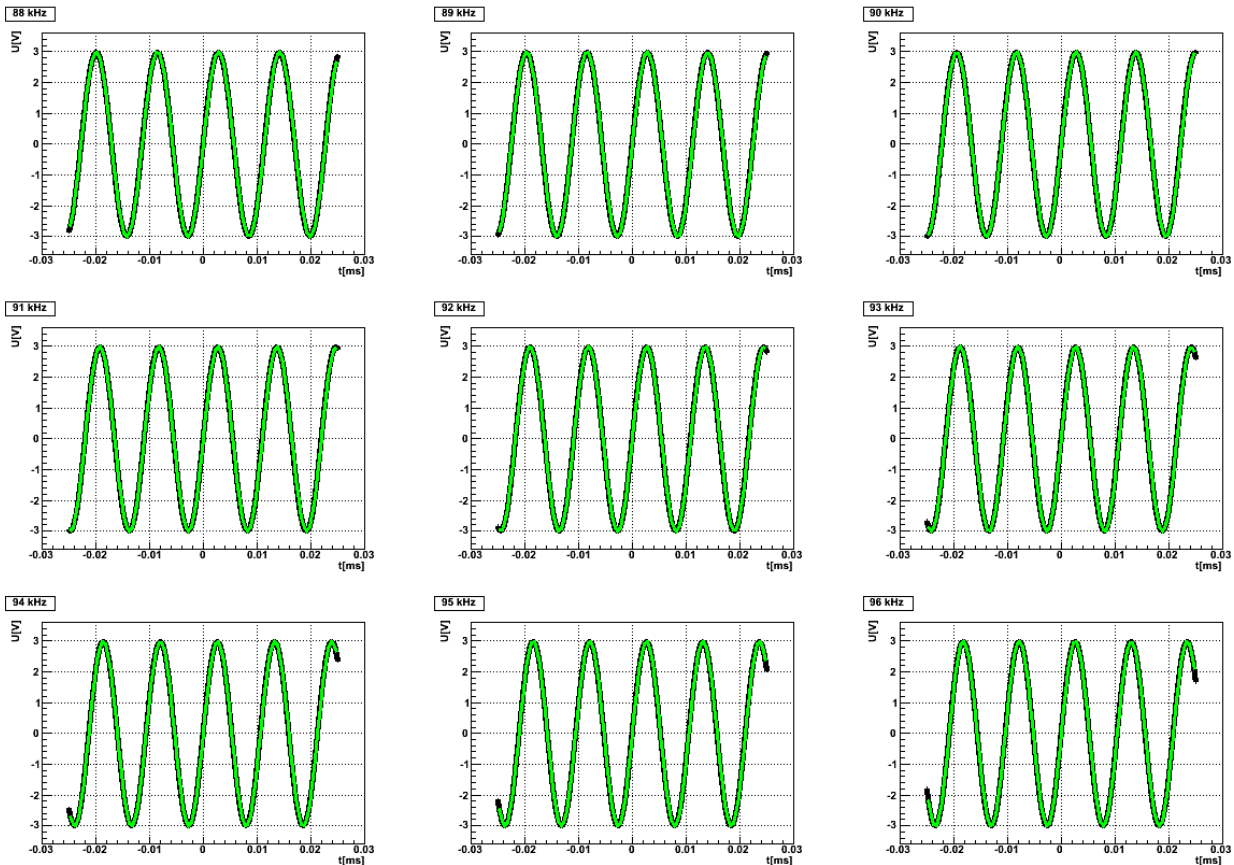


Abbildung 3.3: Sinussignale der Eingangsspannung im Bereich der ersten Resonanz

3.2 Auswertung

Die Auswertung der Messungen erfolge hauptsächlich mittels root-Makros. Zunächst wurden die gemessenen Ein- und Ausgangssignale eingelesen. Zur Bestimmung von $\frac{U_{out}}{U_{in}}$ und φ wurden Sinuskurven an die Werte gefittet (s. Abb. 3.3 und 3.4), wobei ein Fehler der Gemessenen Spannung von $\pm 0.2 \text{ mV}$ angenommen wurde. Aus den so ermittelten Parametern wurden das Amplitudenverhältnis und die Phasenverschiebung zwischen Ausgangssignal und Eingangssignal bei jeder Frequenz bestimmt. Diese Werte wurden mit ihren jeweiligen Fehlern für die weitere Analyse verwendet.

Anschließend wurden die ermittelten Formeln für Amplitudenverlauf und Phasenverschiebung unabhängig voneinander an die jeweiligen Daten gefittet, um die Parameter C_P , C_k , L_k , R_k (für jeweils vier Resonanzen) sowie den Vorwiderstand R zu ermitteln. Für diesen liegt ein bekannter Wert vor ($10 \text{ k}\Omega \pm 5\%$, Herstellerangabe), der als Ausgangswert des Fitvorgangs genutzt wurde. Eine deutliche Abweichung dieses Wertes kann ein Indiz für eine fehlerhafte Funktion sein. Die ermittelten Parameter werden in Tabelle 3.1 und 3.2 aufgeführt, während Abbildung 3.5, 3.7, 3.6 und 3.8 die ermittelten Werte für Amplitudenverlauf und Phasenverschiebung sowie die dazugehörigen Fitfunktionen darstellen.

Die Parameter der beiden Funktionen stimmen weitestgehend überein und in den Abbildungen ist erkennbar, dass die Funktionen den gemessenen Verlauf gut wiedergeben. Die höherfrequenten Resonanzen wurden nicht genauer untersucht, da sie für die angewandte Analysemethode zu schwach erkennbar waren. Zudem werden diese Frequenzen bei der Verwendung in KM3NeT vom vorgesehenen Verstärker stark unterdrückt, da dieser zugleich einen Bandpassfilter darstellt.

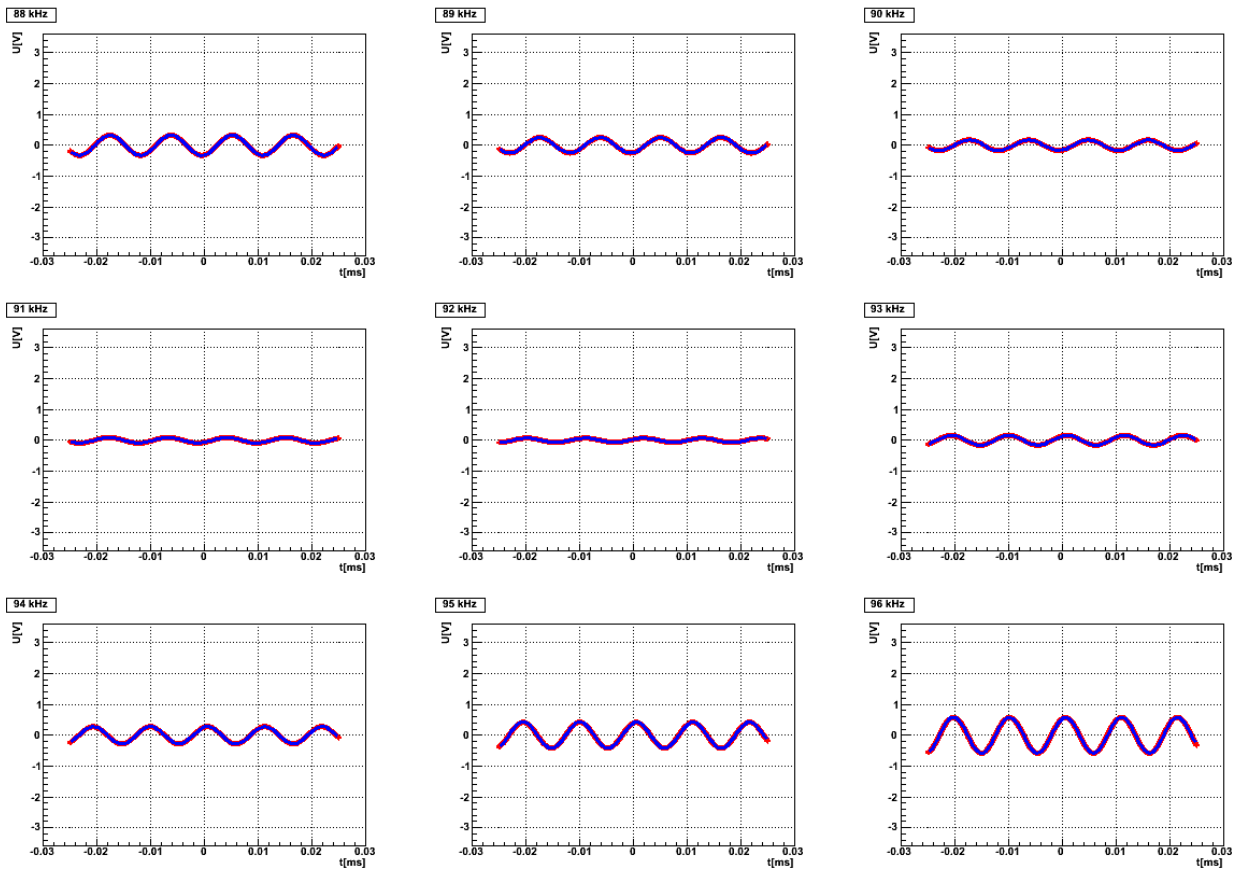


Abbildung 3.4: Sinussignale der Ausgangsspannung im Bereich der ersten Resonanz

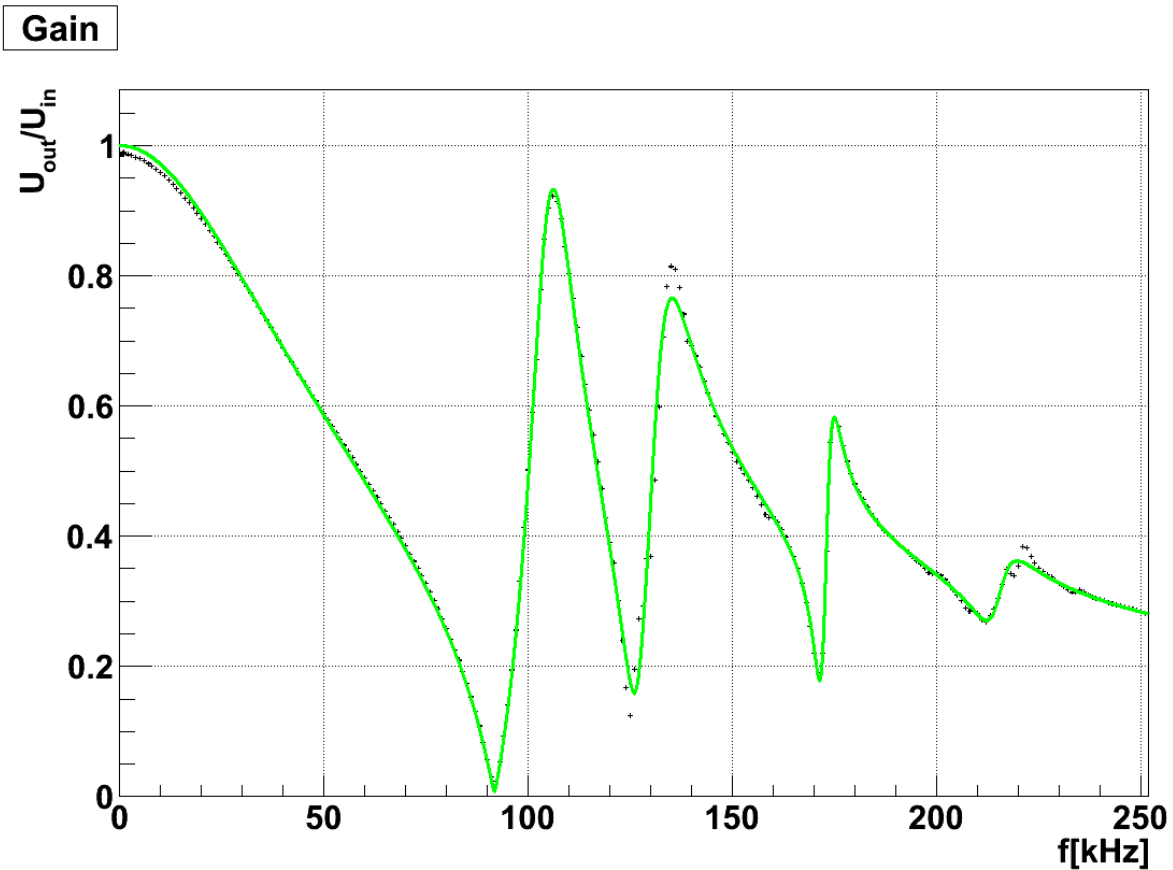


Abbildung 3.5: Frequenzabhängigkeit des Amplitudenverlaufs (Ausschnitt)

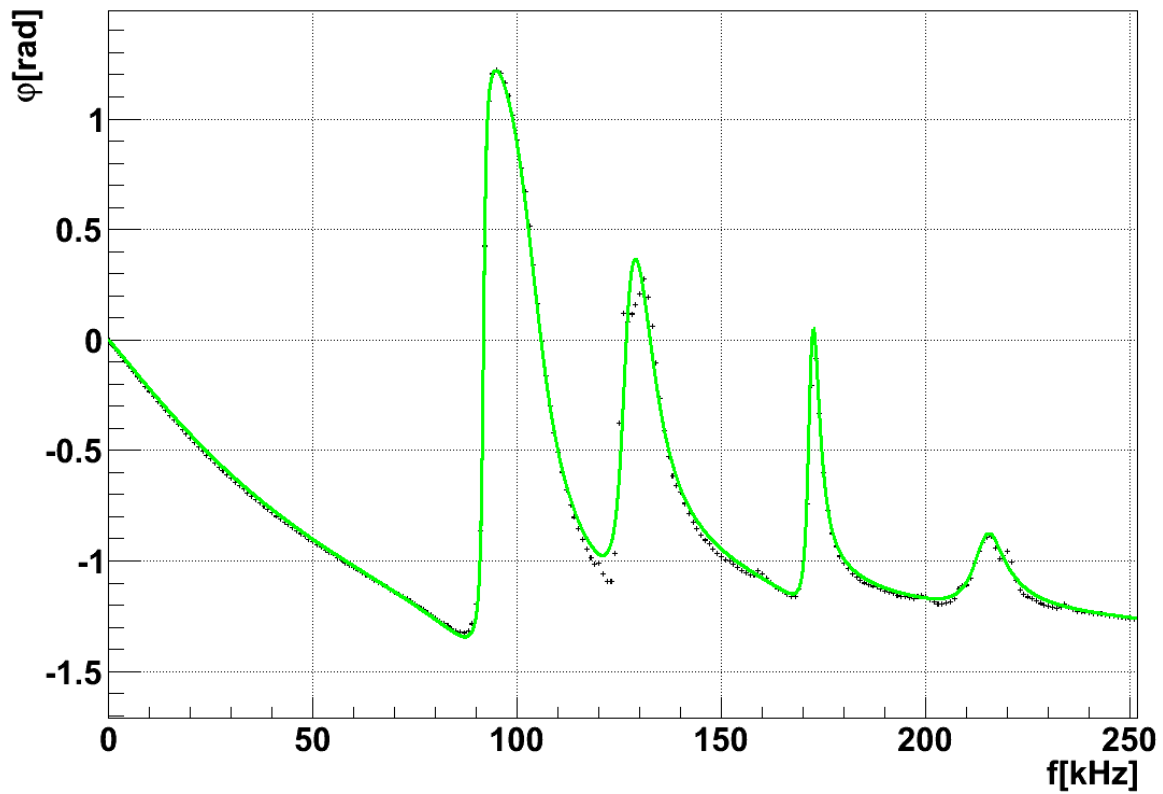
Phase

Abbildung 3.6: Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung (Ausschnitt)

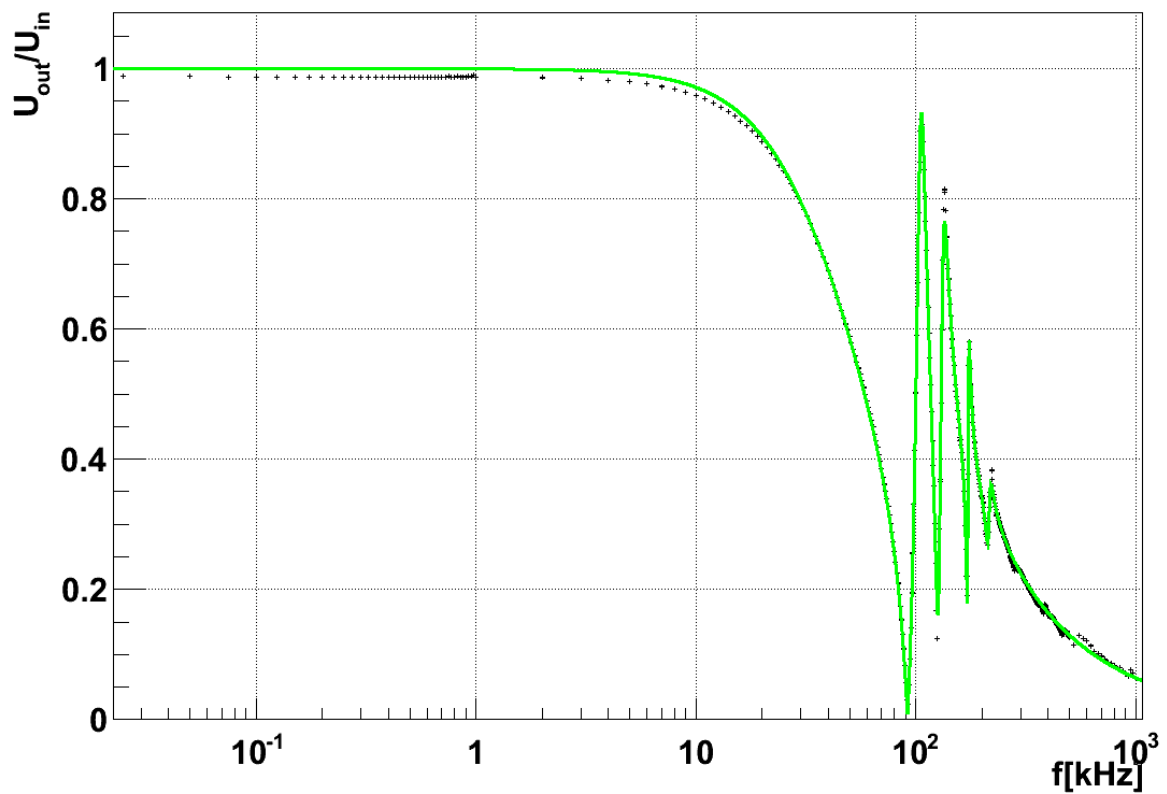
Gain

Abbildung 3.7: Frequenzabhängigkeit des Amplitudenverlaufs in logarithmischer Darstellung

	C [pF]	L [mH]	R [Ω]
Kapazität	250.606 ± 0.055		
1. Resonanz	110.743 ± 0.0267	27.153 ± 0.006	$69.587 + -0.148$
2. Resonanz	19.221 ± 0.00445	82.621 ± 0.0191	$1959.33 + -0.76$
3. Resonanz	4.621 ± 0.002	185.784 ± 0.081	$2508.92 + -1.72$
4. Resonanz	2.973 ± 0.002	185.551 ± 0.122	$9186.48 + -5.80$
Vorwiderstand			$10018.3 + -2.2$

Tabelle 3.1: Parameter der Amplitudenfunktion

	C [pF]	L [mH]	R [Ω]
Kapazität	222.285 ± 0.012		
1. Resonanz	96.026 ± 0.009	31.309 ± 0.003	209.483 ± 0.075
2. Resonanz	16.951 ± 0.002	93.719 ± 0.010	2305.3 ± 0.5
3. Resonanz	4.333 ± 0.002	198.64 ± 0.076	2471.65 ± 2.15
4. Resonanz	2.922 ± 0.001	189.051 ± 0.076	10258.3 ± 4.2
Vorwiderstand			10497.4 ± 0.5

Tabelle 3.2: Parameter der Phasenfunktion

Phase

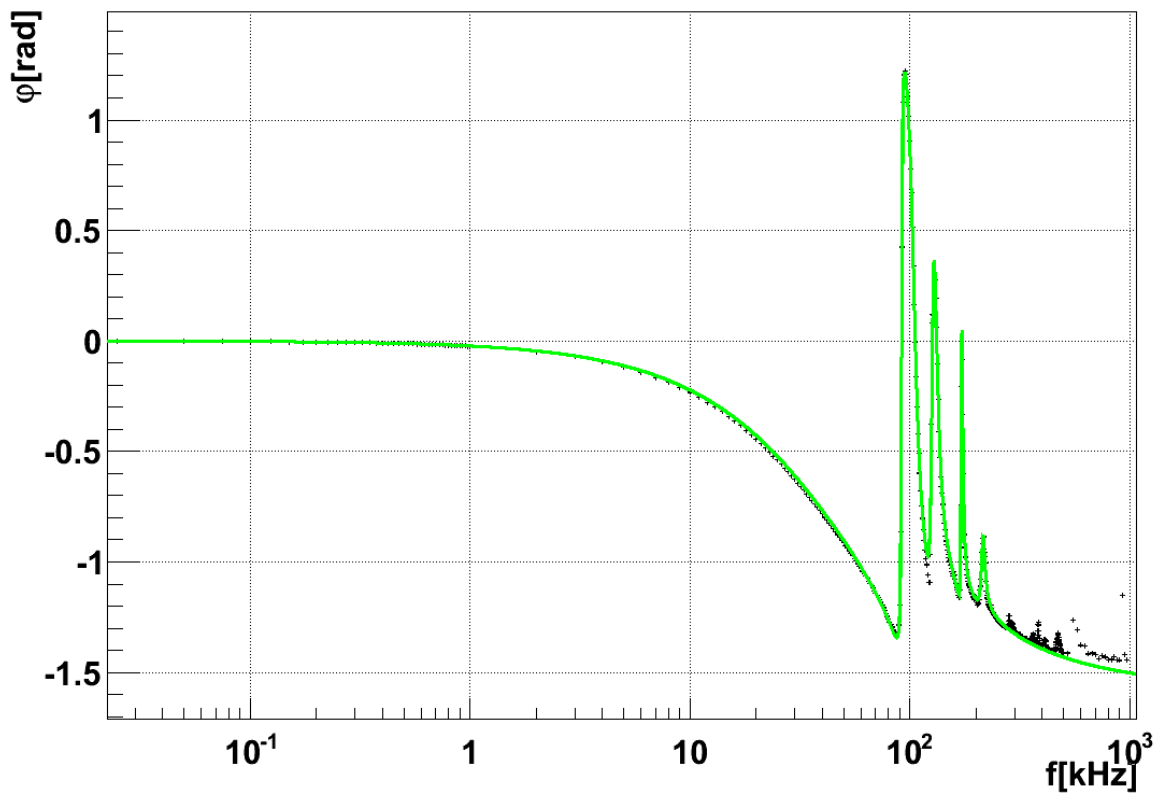


Abbildung 3.8: Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung in logarithmischer Darstellung

Die Abweichungen an der zweiten und vierten Resonanz könnten möglicherweise auf zwei weitere Resonanzen mit ähnlichen Parametern zurückzuführen. Um diese Vermutung zu bestätigen wären weitere Messungen im Bereich dieser Resonanzen nötig gewesen, weshalb darauf verzichtet wurde, dem weiter nachzugehen.

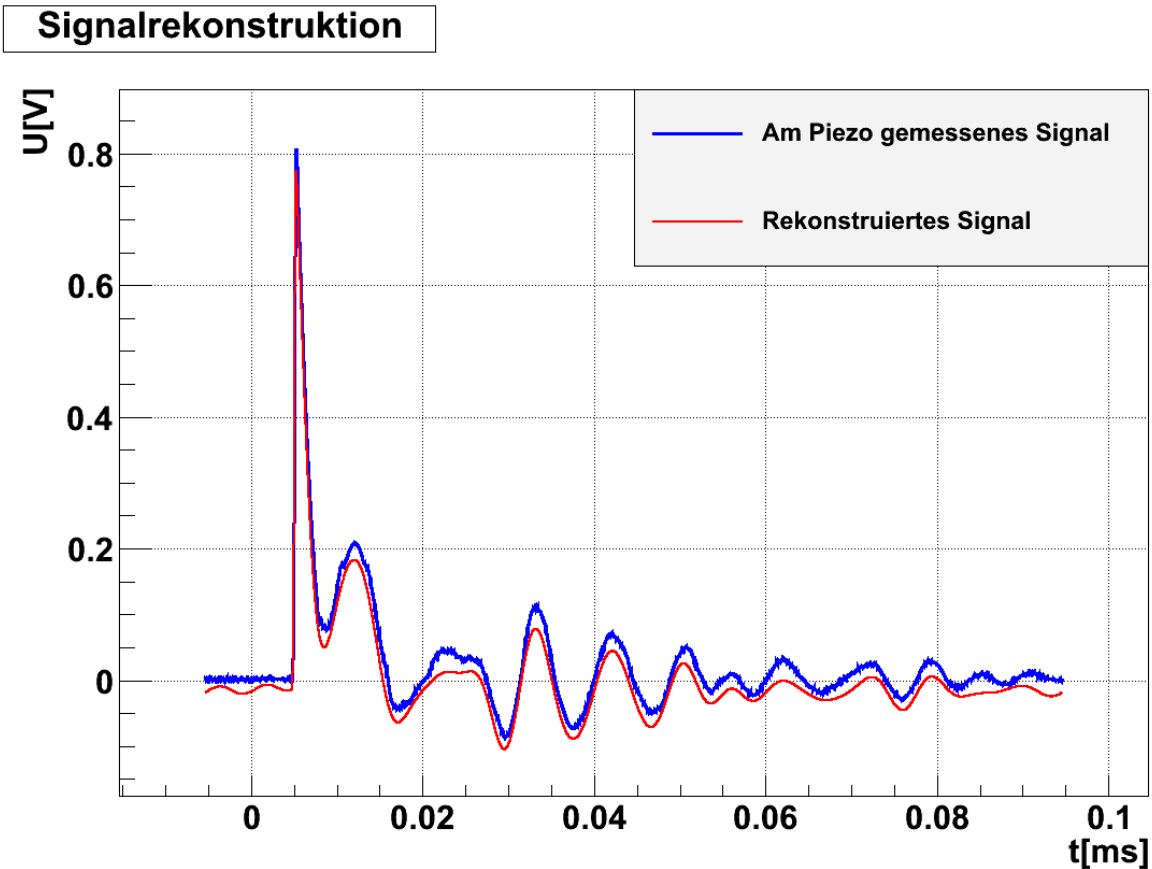


Abbildung 3.9: Gemessenes (blau) und berechnetes (rot) Ausgangssignal

3.3 Überprüfung der Ergebnisse

Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde eine Kontrollmessung durchgeführt, bei der der Piezo statt mit Sinusfunktionen mit einem gepulsten, gaußförmigen Signal angeregt wurde. Aus dem gemessenen Eingangssignal wurde, wie am Beginn dieses Kapitels beschrieben, das Ausgangssignal berechnet. Für die Fouriertransformation wurde hierbei ein FFT-Algorithmus verwendet. Das berechnete Signal gibt die Form der gemessenen Kurve gut wieder (s. Abb. 3.9), es ist jedoch erkennbar, dass die Berechnung immer einen kleineren Wert ergibt als gemessen wurde. Das wird auch deutlich, wenn man die Residuen betrachtet (Abb. 3.10), die etwa um den Wert -0.02 zentriert sind, statt um 0.

Ein möglicher Auslöser könnte der starke Beitrag von hohen Frequenzen zum Eingangssignal sein. In diesem Bereich werden die Resonanzen und Antiresonanzen in den vorliegenden Funktionen nicht berücksichtigt, ihr Beitrag zum Ausgangssignal wird also nicht mehr korrekt wiedergegeben. Das könnte zu einem generell zu niedrig angenommenen Ausgangssignal führen. Zweifelsfrei konnte diese Theorie nicht mehr überprüft werden, da hierzu weitere Messreihen und eine Erweiterung der Funktionen um zusätzliche Resonanzen nötig wäre.

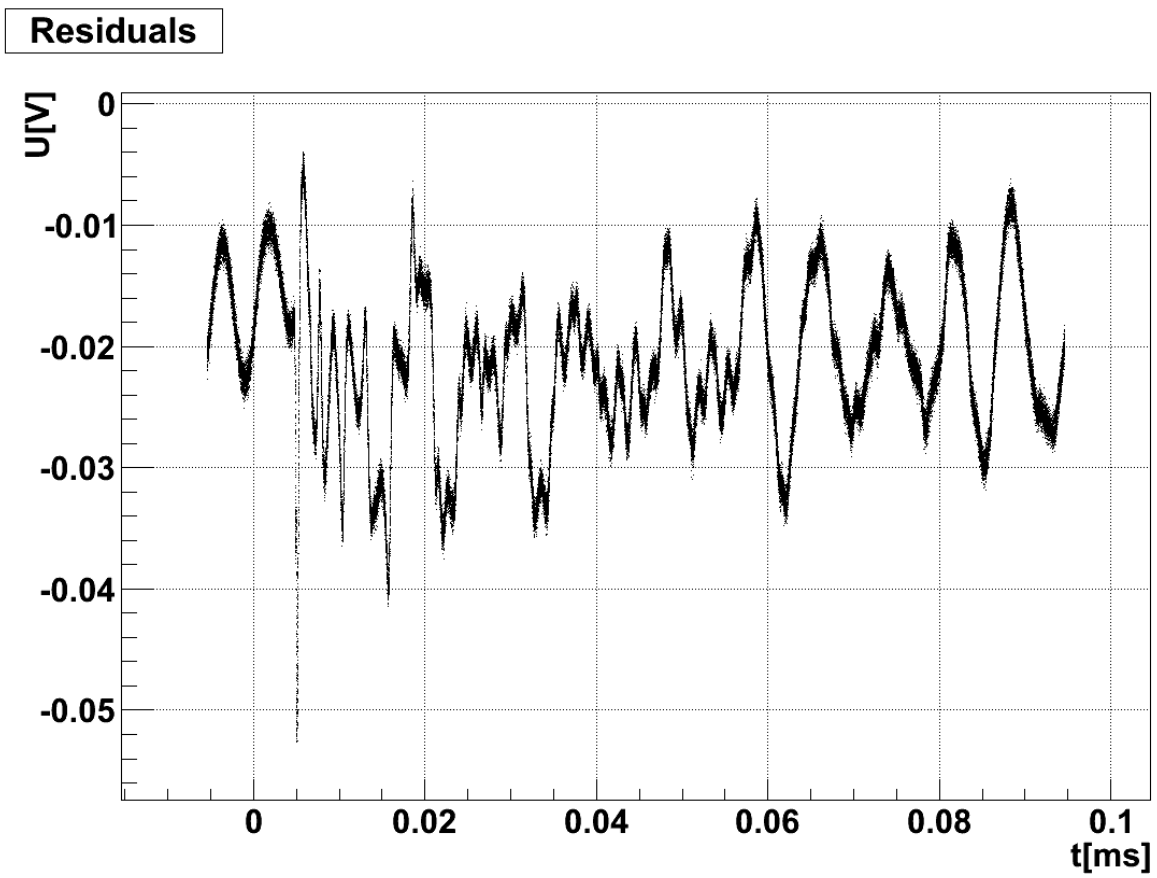


Abbildung 3.10: Residuen

Kapitel 4

Ausblick

Die in dieser Arbeit erarbeiteten Formeln und Parameter zur Beschreibung einer Piezokeramik müssen als Ausgangspunkt für weitere Arbeiten betrachtet werden. Da der Piezo, zusammen mit dem Vorverstärker, in einem Hohlzylinder untergebracht ist, kann er nicht mehr frei schwingen. Auch die Befestigung an der Innenseite der KM3NeT-DOMs mit Klebstoff wird die Schwingungen einschränken. Dies allein wird zu einer verstärkten Dämpfung führen, wovon, ausgehend von den vorliegenden Formeln, vor allem die Parameter R_k betroffen sein werden [1].

Es ist auch nicht auszuschließen, dass der Piezo und die Verstärker, die derzeit im Rahmen einer Masterarbeit charakterisiert werden, sich gegenseitig beeinflussen. Derartige Effekte können möglicherweise als zusätzliche Terme in eine Formel aufgenommen werden, die das gesamte System als eine Einheit beschreibt, müssen jedoch zunächst erfasst und verstanden werden.

Eine Frage, deren Antwort für ein gutes Verständnis der akustischen Sensoren unerlässlich ist, wurde im Rahmen dieser Arbeit noch nicht gestellt: wie koppeln Schallwellen, über die Glaskugeln der DOMs, in den Piezo ein? Bei der hier durchgeführten Untersuchung wurde die Piezokeramik über einen einfachen Widerstand elektrisch zum Schwingen angeregt, da eine mechanische Kopplung ungleich schwerer zu erreichen ist.

Dennoch muss dies noch untersucht werden, bevor Messungen mit diesen Sensoren physikalisch relevante Ergebnisse liefern können.

Literaturverzeichnis

- [1] C.L.Naumann, Development of Sensors for the Acoustic Detection of Ultra High Energy Neutrinos in the Deep Sea, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, (2007)
- [2] K.Graf, Teststrahlungsmessungen zur akustischen Neutrinodetektion: Thermoakustische Schallerzeugung in Wasser, Diplomarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg, 2004
- [3] K.S.Salomon, Simulation und Messung Verschiedener Hydrophonkomponenten zur akustischen Teilchendetektion, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2007
- [4] S. Bevan et al. (ACoRNE Coll.), Simulation of Ultra High Energy Neutrino Interactions in Ice and Water, *Astropart. Phys.* 28 (2007) 366, arXiv:0704.1025v1 [astro-ph].
- [5] KM3Net-Homepage: <http://www.km3net.org/home.php>
- [6] ANTARES-Homepage: <http://antares.in2p3.fr/>
- [7] AMADEUS-Homepage: <http://www.ecap.nat.uni-erlangen.de/acoustics/>
- [8] AMANDE-Homepage: <http://amanda.uci.edu/>
- [9] IceCube-Homepage: <http://icecube.wisc.edu/>
- [10] Kamiokande-Homepage: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/kam/kamiokande.html>
- [11] Super-Kamiokande-Homepage: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

Erklärung

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

Erlangen, 1.8.2012

Stefan Pickel