

Entwicklung eines Messaufbaus zum
Vergleich von akustischen Signalgebern für
das EnEx-RANGE Projekt

von
Marc Klinger

Bachelorarbeit in der PHYSIK

vorgelegt der
FAKULTÄT FÜR MATHEMATIK, INFORMATIK UND
NATURWISSENSCHAFTEN
der RWTH Aachen

im September 2016

angefertigt am
III. PHYSIKALISCHEN INSTITUT B
bei
Prof. Dr. Christopher Wiebusch

Diese Bachelorarbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit David Berling angefertigt. Die Kapitel 1-8 wurden gemeinsam und das Fazit individuell verfasst [Ber16].

Eidesstattliche Versicherung

Klinger, Marc

Name, Vorname

Matrikelnummer (freiwillige Angabe)

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit/Bachelorarbeit/
~~Masterarbeit*~~ mit dem Titel

Entwicklung eines Messaufbaus zum Vergleich von akustischen Signalgebern für das
EnEx-RANGE Projekt

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich auf einem Datenträger eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische Form vollständig übereinstimmen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Aachen, 02.09.2016

Ort, Datum

Unterschrift

*Nichtzutreffendes bitte streichen

Belehrung:

§ 156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

§ 161 StGB: Fahrlässiger Falscheid; fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt

(1) Wenn eine der in den §§ 154 bis 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

(2) Straflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Abs. 2 und 3 gelten entsprechend.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Aachen, 02.09.2016

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation	1
2. Robuste akustische Navigation in Gletscher-Eis (RANGE)	3
2.1. Akustische Lokalisierung	3
2.2. Aufbau der Autonomen Pingereinheit	3
3. Elektroakustische Grundlagen	6
3.1. Ausbreitung von Schall in Festkörpern und Flüssigkeiten	6
3.1.1. Schall in Flüssigkeiten	6
3.1.2. Schall in Festkörpern	6
3.1.3. Reflexionen	7
3.1.4. Dämpfung	8
3.2. Piezoelektrischer Effekt	9
3.3. Piezoelektrische Schallwandler	9
3.3.1. Tonpilz-Schallwandler	11
3.3.2. Hammer-Schallwandler	11
4. Messapparatur und Aufbau der Schallwandler	15
4.1. Signalgenerierung und Datenerfassung	15
4.2. Schallwandler	15
5. Entwicklung einer robusten Methodik zur Datenauswertung	19
5.1. Normierung	19
5.2. Generieren eines Schätzers auf Basis der spektralen Leistungsdichte	20
5.3. Berechnung der spektralen Leistungsdichte mittels der Welch-Methode	20
5.4. Parameter der Methode	21
5.4.1. Segmentlänge	21
5.4.2. Fensterfunktion und Überlappung	22
5.4.3. Intervallbreite	22
5.4.4. Wahl der Parameter im Rahmen dieser Arbeit	22
6. Messungen bei direkter Ankopplung des Sensors	24
6.1. Aufbau	24
6.2. Vormessungen zur Evaluation der Sensitivität	25
6.3. Analyse von Intervallleistungsspektren bei verschiedenen Anziehdrehmomenten und Belastungsanalyse	27
7. Messungen in Wasser	30
7.1. Aufbau der Messung im Wasserbecken	30
7.2. Charakteristik des Audioverstärkers	33
7.3. Elektrische Störung und Schirmung	35

Inhaltsverzeichnis

7.4. Reflexionen und Positionsvariation	42
7.4.1. Methode der Positionsvariation	46
7.5. Reproduzierbarkeit und Messungenauigkeit	48
8. Ergebnisse der Messungen in Wasser	51
8.1. Vergleich verschiedener Tonpilz-Konfigurationen	51
8.2. Vergleich zwischen Hammer- und Tonpilz-Schallwandler	53
9. Fazit	55
Literaturverzeichnis	57
A. Anhang	I
A.1. Werkstoffeigenschaften der Materialien und Datenblätter der Geräte	I
A.2. Messaufbauten zur direkten Einkopplung	V
A.3. Details zum Aufbau der Wassermessungen	VII
A.4. Messaufbau zur Untersuchung der elektromagnetischen Störung	VIII
A.5. Details zu den Messungen mit der Positionsvariation	X
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XV

Abkürzungsverzeichnis

AAL Aachener Akustiklabor

APS Akustisches Lokalisierungssystem (Acoustic Positioning System)

APU Autonome Pingereinheit (Autonomous Pinger Unit)

ARS Akustisches Erkundungssystem (Acoustic Reconnaissance System)

DFT Diskrete Fouriertransformation

EnEx Enceladus Explorer

PSD spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density)

PVDF Polyvinylidenfluorid

PZT Bleizirkonattitanat (Plumbum Zirconate Titanate)

RANGE Robuste autonome Akustische Navigation in Gletscher-Eis

RMS Quadratisches Mittel (Root Mean Square)

1. Motivation

Begründet in der Neugierde des Menschen, begann dieser schon früh zu Entdeckungsreisen aufzubrechen. Dabei beschäftigte ihn oft die Frage, ob er auf eine andere Form von Leben stoßen könnte. Von Zeit zu Zeit gelang es ihm, immer weitere Distanzen zu überwinden und weitreichende Teile des eigenen Planeten zu erkunden.

Mit der Entdeckung des Universums und dessen Weitläufigkeit erreichte die Frage nach einer anderen Form von Leben jedoch eine neue Dimension. Die zunächst spannendste Frage war nun, ob die Menschen und überhaupt das Leben auf der Erde einzigartig ist.

Eine sichere Antwort auf diese Frage ist damals wie heute nicht möglich, doch gelingt es mittlerweile in weitere Entfernung des Universums zu schauen und zumindest eine so umfangreiche Artenvielfalt wie die der Erde innerhalb unseres Sonnensystems und in dessen näheren Umgebung auszuschließen. Nichtsdestotrotz bleibt die eigentliche Frage, ob es eine Form von Leben außerhalb der Erde gibt – und mit dem Beginn erfolgreicher Raumfahrtmissionen im letzten Jahrhundert erreichte die Menschheit einen neuen Meilenstein der technischen Entwicklung, um die Beantwortung dieser Frage für unser Sonnensystem in Angriff zu nehmen.

Eine dieser Raumfahrtmissionen ist die Cassini-Mission, bei welcher sich im Jahr 2005 mehrere Vorbeiflüge am Saturn Mond Enceladus ereigneten [Por+06]. Der mit 504 km im Durchmesser kleine Mond besitzt ein Salzwasser Reservoir, das von einer 30-40 km dicken Eisschicht bedeckt ist. Diese weist am Südpol vier Spalten auf, aus welchen Dampf austritt, welcher organische Verbindungen enthält [Kon+15; Kow+16]. Auf Basis dieser Informationen rückte der Mond Enceladus als möglicher Kandidat für die Suche nach extraterrestrischem Leben in den Fokus und die Idee zur Raumfahrtmission „Enceladus-Explorer“ entstand. Enceladus-Explorer sieht eine Schmelzsonde, die „EnEx-Sonde“, vor, welche sich autonom in den Eispanzer des Enceladus einschmelzen und eine Wasserprobe entnehmen soll [Kow+16].

Diese Bachelorarbeit wurde im Rahmen des Projekts EnEx-RANGE angefertigt, welches Teil der EnEx-Initiative des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt ist. Die EnEx-Initiative hat es sich zur Aufgabe gemacht, die zur Realisierung der Raumfahrtmission „Enceladus-Explorer“ nötigen Technologien zu entwickeln [Hei+16]. Eine dieser ist die robuste autonome akustische Navigation für Operationen in Gletschereis (kurz RANGE), welche innerhalb von EnEx-RANGE entwickelt wird.

Das Ziel dieser Arbeit ist das Entwickeln einer Methodik für den Vergleich verschiedener Emitterdesigns und deren Konfiguration für das akustische Lokalisierungssystem (kurz APS), ein Teilsystem des innerhalb des Projekts RANGE entwickelten Systems, welches der Lokalisierung der EnEx-Sonde dient. Die Anforderungen für die Emitter sind sehr speziell, da einerseits Größe und Gewicht klein gehalten werden sollen, aber andererseits die Reichweite maximiert werden soll. Dies erfordert den Spagat zwischen einer kompakten Konstruktion und einer hohen Sendeleistung bei tiefen Frequenzen, da die Abschwächlänge in Eis exponentiell mit sinkender Frequenz steigt [Sch16].

Beide Designs wurden bereits bei Messungen einer vorangehenden Bachelorarbeit von Chri-

1. Motivation

stoph Herbert [Her16] auf Resonanzen im Bereich unter 50 kHz besonders im Hinblick auf die Dimensionierung der verwendeten Massen untersucht. Eine Bestätigung der Theorie oder eine begründete Favorisierung eines Emitterdesigns gelang jedoch im Rahmen der Arbeit von Christoph Herbert nicht. Das motiviert eine darauf aufbauende Untersuchung der beiden Schallwandlertypen unter Variation anderer Parameter. Innerhalb dieser Arbeit wurden folglich Auswirkungen bisher nicht untersuchter Parameter an einem der Emittertypen in den Fokus genommen, jedoch erwiesen sich diese nicht als zielführend für den Vergleich der Emitterdesigns in Bezug auf den Einsatz in Eis. Daher wurden die Emitter in das Trägersystem des APS integriert und eine Methode entwickelt, die Messungen in Wasser ermöglicht, da diese dem späteren Einsatzszenario näher kommen. Schließlich erfolgte mit dieser Methode ein Vergleich beider Emittertypen.

2. Robuste akustische Navigation in Gletscher-Eis (RANGE)

Die im Rahmen von EnEx-RANGE zu entwickelnde Navigationstechnologie umfasst das ARS von *Acoustic Reconnaissance System*, zu deutsch „akustisches Erkundungssystem“ und das APS von *Acoustic Positioning System*, zu deutsch „akustisches Lokalisierungssystem“ [Kow+16]. Das zur Überwachung der unmittelbaren Umgebung vor der Schmelzsonde zuständige ARS basiert auf phasengesteuerten Piezoelementen. Ultraschallwellen werden von diesen ausgesendet und das zurückgeworfene Signal auf Amplituden- und Laufzeitunterschiede untersucht. Mögliche Hindernisse verursachen solche Echos aufgrund ihrer anderen akustischen Impedanz im Vergleich zu der von Eis.

2.1. Akustische Lokalisierung

Das APS baut mittels Trilateration ein lokales Referenzsystem auf und kann die Position der EnEx-Sonde darin bestimmen (Abb. 2.1) [Hei+16]. Eine wichtige Rolle spielt hier die so genannte APU. Es werden zusätzlich zur EnEx-Sonde mehrere APUs in das zu untersuchende Eisvolumen eingeschmolzen. Durch das Senden und Empfangen von akustischen Signalen, können über eine Laufzeitbestimmung die Abstände der APUs zueinander, sowie der jeweiligen APU zur EnEx-Sonde bestimmt werden. Die Kommunikation zwischen EnEx-Sonde und APUs findet mit Hilfe von Kabelverbindungen statt. Das System besitzt ein selbstständiges Optimierungssystem, welches auf Basis der akustischen Signalqualität und der wechselseitig ausgemessenen Positionen der APUs entscheidet, ob weitere APUs eingeschmolzen werden müssen oder eine bereits eingeschmolzene APU sich tiefer positionieren muss.

2.2. Aufbau der Autonomen Pingereinheit

Die APU bildet die Hauptkomponente des APS. Das dezentral angelegte System bedingt, dass sämtliche zur Positionsbestimmung, Kommunikation und Datenverarbeitung benötigten Systeme in die APU integriert werden. In Abb. 2.2 ist ein bereits realisierter Aufbau, die Version *v0* der APU mit integriertem Schmelzsystem sowie einem Kommunikationsmodul, Temperatur- und Innendrucksensorik mit Datenerfassung und Synchronisation, dargestellt. Diese Version wurde bereits während zweier Feldtests erfolgreich eingesetzt [Hei+16].

Das Trägersystem der APU ist zylindrisch mit einem Durchmesser von 8 cm. Es ist aufgebaut aus einem Schmelzkopf aus HOVADUR® CNCS [14], eine Legierung aus Kupfer, Nickel und Silizium mit Chromzusatz, welche eine hohe thermische Leitfähigkeit mit guter Korrosions- und Abriebbeständigkeit, sowie Härte und Festigkeit verbindet. Das Mittelstück ist ein Hohlzyylinder aus Edelstahl mit 2 mm Wandstärke, welcher durch ein Edelstahl-Heck abgeschlossen wird. Der Kopf ist mittels zweier O-Ringe aus Kunststoff – bisher kamen Fluor-Polymer-Kautschuk und Nitrilkautschuk zum Einsatz – in den Edelstahlzyylinder gesteckt und mit M4 Schrauben

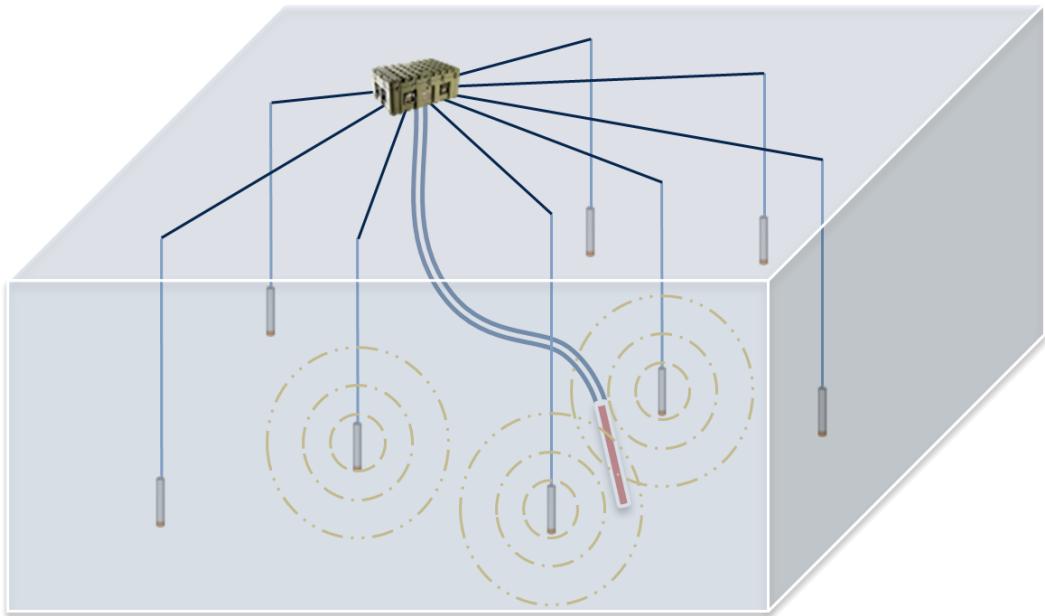


Abbildung 2.1.: Akustisches Lokalisierungssystem: Das Netzwerk aus APUs bildet mittels Laufzeitmessung akustischer Signale ein lokales Referenzsystem für die EnEx-Sonde (in rot dargestellt). [Hei+16, adaptiert]

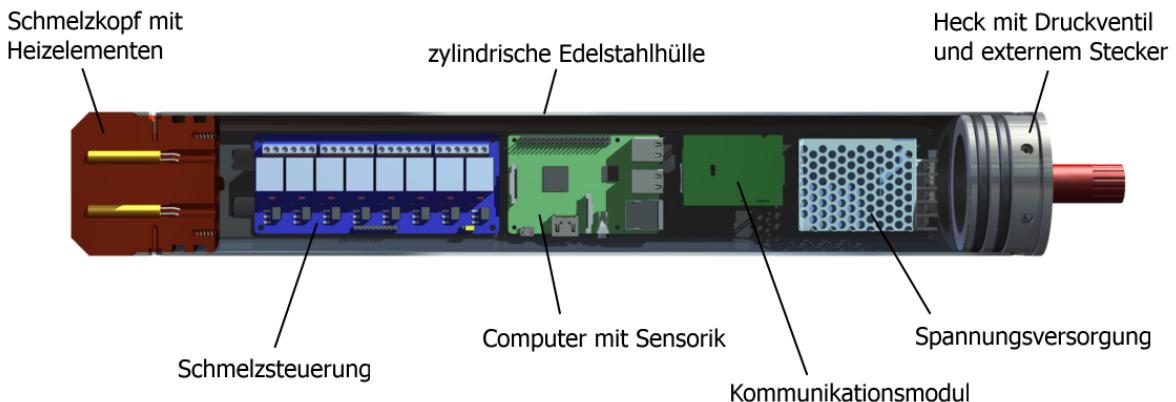


Abbildung 2.2.: Aufbau einer Autonomen Pingereinheit ohne akustische Sender und Empfänger (Version v0). Das Trägersystem bilden Schmelzkopf mit Heizelementen, eine zylindrische Edelstahlhülle und der Heckaufsatz mit Druckventil und einem externen Stecker. Darin befindet sich die Nutzlast bestehend aus der Schmelzsteuerung, einem Computer mit Sensorik zur Temperatur- und Druckmessung sowie dem Kommunikationsmodul und einer Spannungsversorgung. [Lin16, adaptiert]

fixiert. Diese fungieren als Bolzen durch Löcher im Zylindergehäuse, welche in den Schmelzkopf eingeschraubt werden. Das Heck ist analog an den Edelstahlzylinder gekoppelt und besitzt einen zentral auf der abschließenden Oberfläche befestigten Haken zur Befestigung der APU mit Seilen, sowie einen drei-poligen Stecker, welcher das Einführen elektronischer Leitungen in ein Vakuum ermöglicht. Zudem besitzt das Heck ein Ventil, über welches ein Unterdruck innerhalb der APU von 0.3 bar erzeugt werden kann [Lin16].

Zu den auf den Einschmelzvorgang fokussierten Systemen soll nun ein System zur Generierung akustischer Signale integriert werden. Speziell im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Möglichkeiten des Aufbaus eines piezoelektronischen Schallwandlers direkt auf dem Schmelzkopf analysiert.

3. Elektroakustische Grundlagen

3.1. Ausbreitung von Schall in Festkörpern und Flüssigkeiten

Bei der Untersuchung von Schall in verschiedenen Medien muss zwischen Festkörpern sowie Flüssigkeiten und Gasen unterschieden werden. Dies liegt daran, dass sich die Teilchen in Flüssigkeiten und Gasen frei bewegen können und es somit keine Kopplung zwischen ihnen gibt, die zu einer rücktreibenden Kraft führen würde, wie dies durch die Strukturen eines Festkörpers der Fall ist [Dem15, S. 354]. Im Rahmen dieser Arbeit ist besonders der Schall in Wasser sowie dem Metall, aus dem der Schmelzkopf besteht, von Interesse.

3.1.1. Schall in Flüssigkeiten

In einer Flüssigkeit gibt es nur longitudinale Schallwellen. Betrachtet man eine ideale Flüssigkeit, so lässt sich für diese eine Schallgeschwindigkeit für kleine Amplituden von

$$v_{Fl} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3.1)$$

berechnen [Dem15, S. 356]. Dabei ist K der Kompressionsmodul und ρ die Dichte der Flüssigkeit.

Im Falle von Wasser ergibt dies eine Schallgeschwindigkeit von ca. 1480 m/s [LSW09, S. 16].

3.1.2. Schall in Festkörpern

Die Beschreibung von Schall in Festkörpern gestaltet sich als etwas komplexer als in Flüssigkeiten, da bei Festkörpern sowohl longitudinale (Dichte-Wellen [LSW09, S. 111]) als auch transversale Wellen (Schub- oder Scherwellen [LSW09, S. 112]) möglich sind [Dem15, S. 354]. Alle auftretenden Schallwellen lassen sich so als Überlagerung dieser beiden Wellentypen darstellen [LSW09, S. 109]. Betrachtet man einen Festkörper mit dem Elastizitätsmodul E und dem Schermodul G , so kann man für diesen die Possion-Zahl oder Querkontraktionszahl

$$\mu = -\frac{\Delta d}{d} / \frac{\Delta L}{L} \quad (3.2)$$

definieren. Diese beschreibt das Verhältnis aus Querkontraktion zu Dehnung und es gilt [Dem15, S. 158]:

$$\frac{E}{2G} = 1 + \mu . \quad (3.3)$$

Damit lässt sich die longitudinale Schallgeschwindigkeit für kleine Amplituden angeben als [Dem15, S. 353]:

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} = \sqrt{\frac{2G(1-\mu)}{\rho(1-2\mu)}} . \quad (3.4)$$

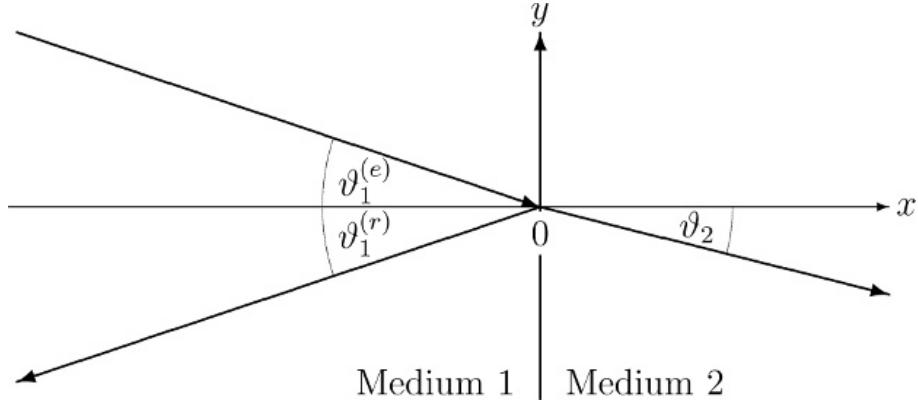


Abbildung 3.1.: Skizze zur Reflexion und Transmission einer Schallwelle beim Übergang von Medium 1 in Medium 2 entlang einer Ebene [LSW09, S. 64]

Für die transversale Schallgeschwindigkeit ergibt sich analog [Dem15, S. 353]:

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.5)$$

Für das in dieser Arbeit im Schmelzkopf verwendete Material Howadur CNCS folgt so mit $E = 140 \text{ GPa}$, $\mu = 0.33$ und $\rho = 8.84 \text{ g/cm}^3$ [14; Bar]:

$$v_L \approx 4844 \text{ m/s} \quad v_T \approx 2400 \text{ m/s} \quad (3.6)$$

3.1.3. Reflexionen

Bei der Betrachtung des Grenzübergang zweier verschiedener Medien mit einer Ebene als Grenzfläche wie in Abb. 3.1 gibt es analog zur Optik eine reflektierte und eine transmittierte Welle [LSW09, S. 55]. Ebenso analog gilt auch hier, dass der Einfallswinkel $\vartheta_1^{(e)}$ der einlaufenden Welle gleich dem Ausfallwinkel $\vartheta_1^{(r)}$ der reflektierten Welle ist [LSW09, S. 65]: $\vartheta_1^{(e)} = \vartheta_1^{(r)} = \vartheta_1$. Außerdem kann man für eine solche Grenzfläche einen Reflexionsfaktor definieren:

$$r = \frac{Z_2 \cos \vartheta_1 - Z_1 \sqrt{1 - (\frac{v_2}{v_1} \sin \vartheta_1)^2}}{Z_2 \cos \vartheta_1 + Z_1 \sqrt{1 - (\frac{v_2}{v_1} \sin \vartheta_1)^2}} \quad (3.7)$$

Dabei sind $Z_{1/2}$ die Schallkennimpedanzen und $v_{1/2}$ die Schallgeschwindigkeiten der Medien 1 bzw. 2 und ϑ_1 der Einfallswinkel [LSW09, S. 66]. Die Schallkennimpedanz oder auch Wellenwiderstand Z lässt sich für isotrope Medien über den Quotienten aus Schalldruck p und Schallschnelle v definieren [LSW09, S. 27]:

$$Z_0 = \frac{p}{v} = \rho \cdot v_{Schall} \quad (3.8)$$

Für Wasser liegt dieser Wert beispielsweise bei $Z_{Wasser} = 1.48 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$, für Luft liegt er bei $Z_{Luft} = 414 \text{ Ns/m}^3$ [LSW09, S. 27].

Speziell für den Übergang von Wasser in Luft mit einer Schallgeschwindigkeit in Luft von $v_{Luft} = 344 \text{ m/s}$ [LSW09, S. 16] ergibt sich so der in Abb. 3.2 dargestellte Verlauf. Dieser zeigt,

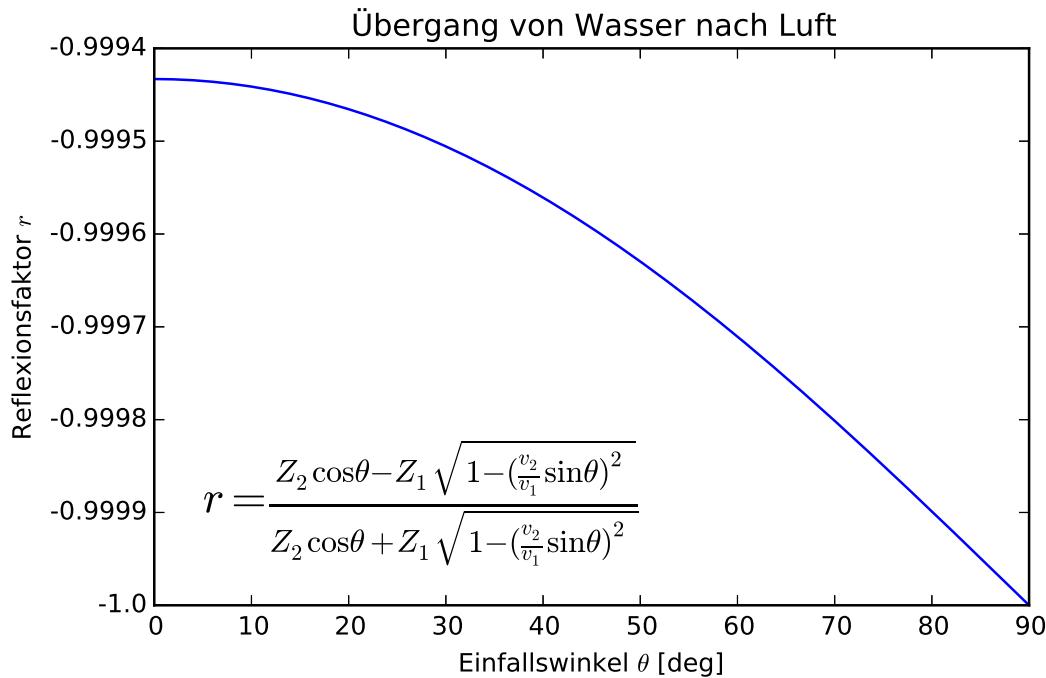


Abbildung 3.2.: Winkelabhängigkeit des Reflexionsfaktors beim Übergang von Wasser in Luft: Es wird näherungsweise die komplette Intensität des Schalls im Wasser reflektiert.

dass aufgrund der deutlich größeren Impedanz von Wasser für alle Winkel nahezu aller Schall reflektiert wird.

3.1.4. Dämpfung

Betrachtet man Schall in realen Medien, so gibt es verschiedene Effekte, die zur Dämpfung beitragen. Dabei ist bei Messungen in einem Wasserbehälter besonders die Dämpfung in Wasser von Interesse. Dort gibt es zwei Ursachen, die zur Schalldämpfung führen. Diese sind in folgender Formel zusammengefasst [LSW09, S. 542]:

$$\frac{I}{I_0} = \underbrace{\left(\frac{r_0}{r}\right)^2}_{\text{geometrisch}} \cdot \underbrace{e^{-2\alpha(r-r_0)}}_{\text{Energieverluste}} \quad (3.9)$$

Dabei ist I die Schallintensität bei einer Kugelwelle nach einer Strecke r , wenn bei der Referenzposition r_0 die Intensität I_0 beträgt. Der erste geometrische Faktor beschreibt dabei die Tatsache, dass sich die Intensität bei einer Kugelwelle auf eine Kugeloberfläche verteilt, die mit dem Radius quadratisch ansteigt. Der zweite Faktor beschreibt die Dämpfung der Schallintensität durch Energieverluste an das Wasser. Diese werden im Wesentlichen durch innere Reibung, irreversible Wärmeverluste ans Wasser und molekulare Absorption durch Anregung innerer Freiheitsgrade der Moleküle verursacht [LSW09, S. 35]. Der skalierende Faktor α heißt hierbei Dämpfungskonstante und sein Kehrwert ist die Abschwächlänge λ [LSW09, S. 37]. Letztere liegt für Wasser bei ca. 10^5 m [LSW09, Abb. 17.2, S. 538], sodass die Dämpfung durch Energieverluste bei Entfernung im Bereich von wenigen Metern im Folgenden gegenüber dem geometrischen Anteil

vernachlässigt wird.

3.2. Piezoelektrischer Effekt

Als Piezoelektrischen Effekt bezeichnet man die Verschiebung der Ladungsschwerpunkte in manchen Kristallstrukturen durch mechanische Deformation (vgl. Abb. 3.3). Dabei entsteht ein Dipolmoment und es lässt sich eine Spannung abgreifen. Umgekehrt ist es ebenfalls möglich, durch das Anlegen einer Spannung eine mechanische Deformation zu erzeugen [LSW09, S. 338]. Materialien, die diese Eigenschaft besitzen, heißen piezoelektrische Materialien und eignen sich gut als elektroakustische Wandler. Sie lassen sich grundsätzlich in die vier Gruppen Einkristalle, Polykristallin-keramische Stoffe, Semikristalline Kunststoffe und zellulare polymere Ferroelektrete einteilen. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit Bleizirkonattitanat (PZT), einem polykristallin-keramischen Stoff, und Polyvinylidenfluorid (PVDF), das zu den Semikristallinen Kunststoffen gehört, gearbeitet [LSW09, S. 344,345].

Zeigen elektrisches Feld und die mechanische Verformung in die gleiche Richtung, so spricht man vom longitudinalen Piezoeffekt bzw. einem Dickenschwinger (vgl. Abb. 3.3, Mitte). Stehen sie senkrecht zueinander, bezeichnet man dies als transversalen Piezoeffekt bzw. Längsschwinger (vgl. Abb. 3.3, rechts) [LSW09, S. 339]. Mathematisch beschrieben wird dies durch eine lineare Beziehung zwischen mechanischer Spannung T und Dehnung S sowie der dielektrischen Verschiebung D und dem elektrischen Feld E [Len+10, S. 352]:

$$d_n = \epsilon_{mn}^T E_m + d_{nj} T_j \quad n = 1..3, m = 1..3, j = 1..6 \quad (3.10)$$

$$S_i = d_{mi} E_m + s_{ij}^E T_j \quad i = 1..6, m = 1..3, j = 1..6 . \quad (3.11)$$

Im Spezialfall des Dickenschwingers kann man mit geeigneten Näherungen durch die Randbedingungen dieses Gleichungssystems auf 2 Gleichungen reduzieren (vgl. Abb. 3.4) [Len+10, S. 353]:

$$D_3 = \epsilon_{33}^T E_3 + d_{33} T_3 \quad S_3 = d_{33} E_3 + s_{33}^E T_3 . \quad (3.12)$$

Wird nun durch eine entsprechende Halterung dafür gesorgt, dass die mechanische Spannung T_3 konstant bleibt, lässt sich eine Verformung des Dickenschwingers linear zur Änderung des elektrischen Feldes erzeugen. Benutzt man außerdem eine Geometrie mit zwei parallelen Randflächen, die senkrecht zur Verformung S_3 ist, so gilt $E = \frac{U}{d}$ [Dem14, S. 20]. Das bedeutet insbesondere, dass die mechanische Verformung linear zur am Piezoelement anliegenden Spannung U ist.

3.3. Piezoelektrische Schallwandler

Der piezoelektrische Effekt bietet somit die Möglichkeit, mithilfe von piezoelektrischen Materialien einen Schallwandler zu konstruieren. Im Folgenden werden zwei Designmöglichkeiten vorgestellt, die in dieser Arbeit untersucht werden. Beide verwenden ringförmige Piezokeramiken als Dickenschwinger. Diese sind eine abgewandelte Form des sogenannten Tonpilz-Schallwandlers (siehe Abschnitt 3.3.1) sowie des Hammer-Schallwandlers (siehe Abschnitt 3.3.2).

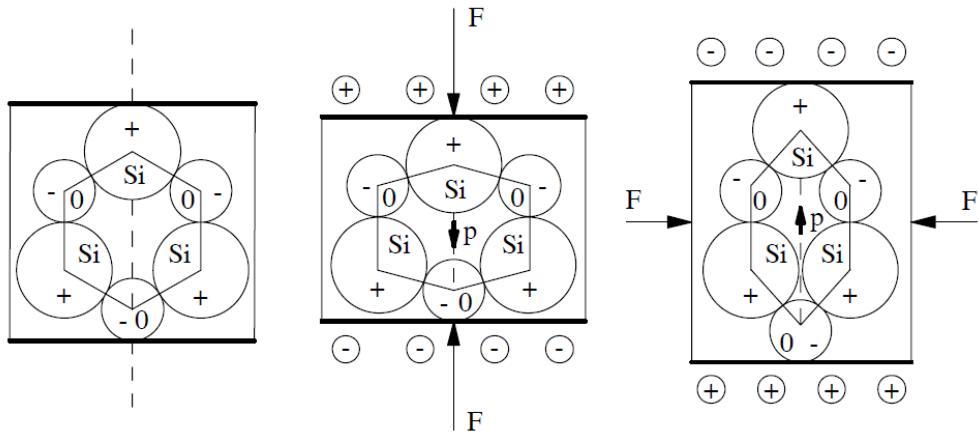


Abbildung 3.3.: Piezoelektrischer Effekt: Links sieht man die Kristallstruktur in Ruhelage, in der Mitte bei longitudinaler und rechts bei transversaler Belastung.[LSW09, S. 338]

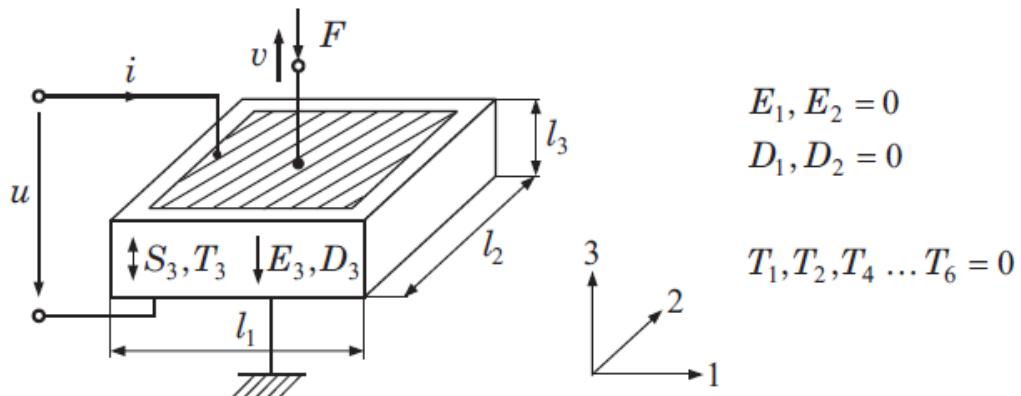


Abbildung 3.4.: Skizze eines Dickenschwingers: F bezeichnet die Kraft, u die Spannung zwischen den beiden Piezoelektroden sowie i den dadurch entstehenden Strom, S die mechanische Verformung, T die mechanische Spannung, E das elektrische Feld und D die Dielektrische Verschiebung. l_{1-3} sind die geometrischen Maße und v die Geschwindigkeit der Bewegung des Piezoelektrischen Materials. [Len+10, S. 353]

3.3.1. Tonpilz-Schallwandler

Normalerweise wird für einen Tonpilz-Schallwandler der in Abb. 3.5(a) skizzierte Aufbau verwendet [SB07]. Dabei werden eine möglichst schwere Heckmasse, ringförmige Piezoelemente und eine eher leichte Kopfmasse gestapelt. Diese sind alle zylindersymmetrisch geformt und mit einer Aushöhlung entlang der Symmetriearchse ausgestattet. Durch diese Aushöhlung verläuft eine Gewindestange, auf welcher durch eine Mutter alle Komponenten mit einem bestimmten Druck in Position gehalten werden. Es spielt eine wichtige Rolle, wie viele Piezoscheiben verwendet werden und dass abhängig von der Kontaktierung auf die richtige Polarisierung geachtet wird. Wird dann eine Wechselspannung an die Piezoelemente angelegt, regen diese das ganze System zum Schwingen an.

Mittels eines vereinfachten mechanischen Modells aus Federn und Massen lässt sich eine Resonanzfrequenz für den idealen Tonpilz-Schallwandler angeben [SB07, S. 99,101]:

$$f_{res,T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m_{eff}}} \quad \text{mit} \quad D = \frac{A}{n t s_{33}^E} \quad \text{und} \quad m_{eff} = \frac{M_K + M_H}{M_K M_H} \quad (3.13)$$

Dabei kann man D als Federkonstante und m_{eff} als effektive Masse interpretieren. A ist die Fläche der verwendeten n Piezokeramikscheiben, t deren Dicke und s_{33}^E deren Elastizitätskonstante. In die effektive Masse gehen die Masse des Schmelzkopfes M_K und die Heckmasse M_H ein. Dieses Modell wird auch näher in der Bachelorarbeit von Christoph Herbert diskutiert [Her16].

Für gewöhnlich versucht man durch ein hohes Verhältnis von Heck- zu Kopfmasse den Großteil der Bewegung auf die Kopfmasse zu verlagern, damit diese mit hoher Geschwindigkeit und Amplitude schwingt und so viel Leistung in ihre Richtung abgegeben wird [SB07, S. 100]. Da der Schmelzkopf der verwendeten APU voraussichtlich den besten Kontakt zum Eis hat, bietet es sich an, die akustische Kopplung über den Kopf durchzuführen, diesen also auch als Kopfmasse für den Schallwandler zu verwenden. Das birgt allerdings den Nachteil, dass das typische Verhältnis von großer Heckmasse zu kleiner Kopfmasse nicht erhalten werden kann.

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Schallwandler basieren auf dem Tonpilz-Konzept, jedoch mit stark vergrößerter Kopfmasse. Sie werden aus Gründen der Verständlichkeit und Einfachheit trotzdem als Tonpilz-Schallwandler bezeichnet. Es werden zwei Konfigurationen dieses Konzepts in Betracht gezogen, eine mit zwei Piezokeramiken und eine mit vier Piezokeramiken. In Abb. 3.5(b) ist dieses Konzept dargestellt. Auf die konkrete Realisierung wird in Abschnitt 4.2 eingegangen.

3.3.2. Hammer-Schallwandler

Der Aufbau eines typischen Hammer-Schallwandlers in Abb. 3.7(a) ähnelt dem des Tonpilz-Schallwandlers [PTM]. Auch er besitzt eine Kopfmasse und eine Heckmasse, verbunden durch eine Gewindestange. Im Unterschied zum Tonpilz-Schallwandler wird aber hierbei zwischen den Piezoscheiben noch eine Schwungmasse eingefügt. Hinzu kommt, dass Polung und Kontaktierung der Piezokeramiken so gewählt werden müssen, dass die Schwungmasse jeweils von beiden Piezostapeln in die gleiche Richtung bewegt wird. Dadurch hämmert sie zwischen Kopf und Heck hin und her. Die Länge des gesamten Schallwandlers ändert sich dabei im Idealfall nicht. Auch für den Hammer-Schallwandler lässt sich mittels eines vereinfachten mechanischen Modells eine Resonanzfrequenz angeben. Dieses Modell wird in der Bachelorarbeit von Christoph Herbert motiviert und ist in Abb. 3.6 dargestellt. Auf der linken Seite ist das Modell mit zwei Federn an den Positionen der Piezokeramikscheiben und einer Schwungmasse M_S zu sehen. Dies

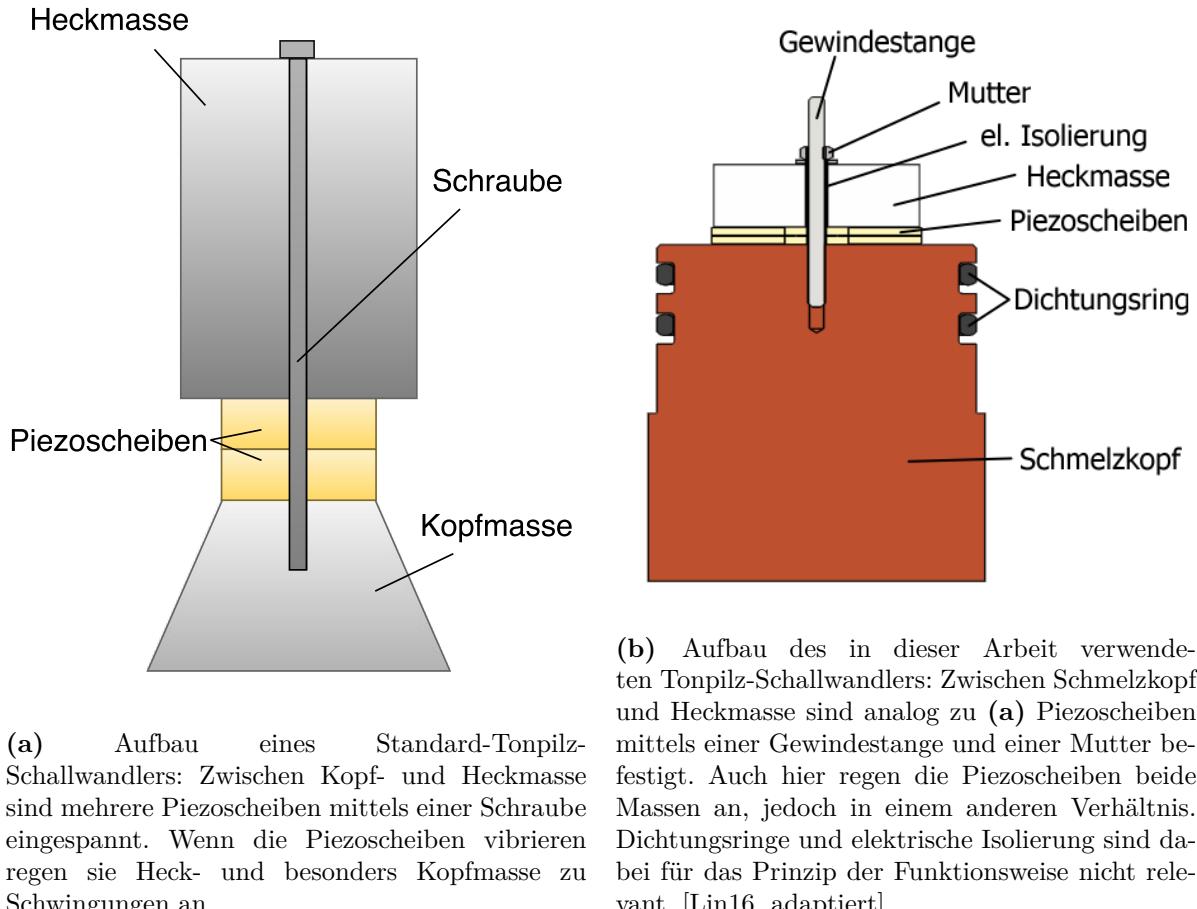


Abbildung 3.5.: Aufbauskizze ohne elektrische Kontaktierung: Links das Standard-Tonpilz-Design, rechts das in dieser Arbeit verwendete Design

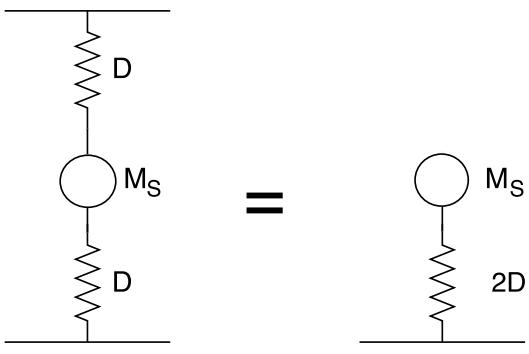


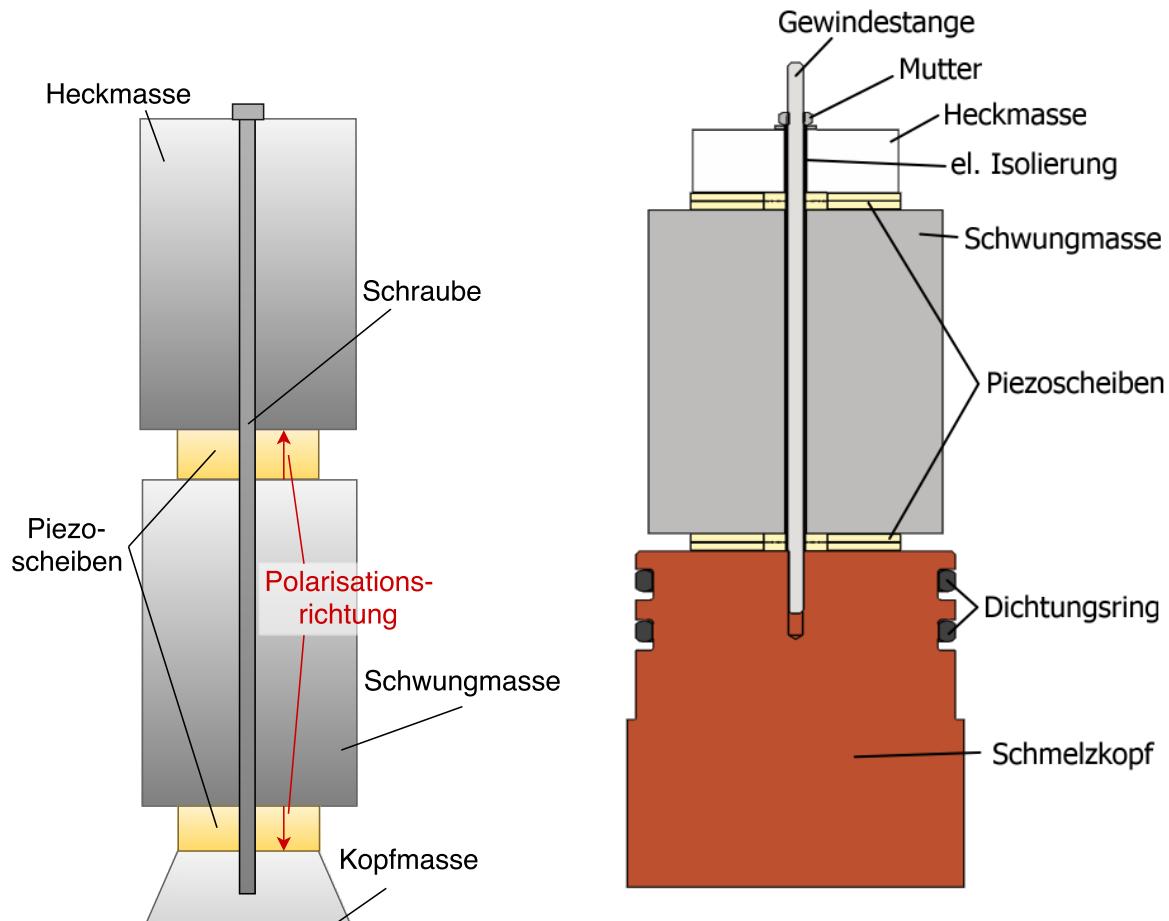
Abbildung 3.6: Vereinfachtes mechanisches Modell zur Beschreibung des Hammer-Schallwandlers: Links ist das Modell zu sehen, bei dem die Piezokeramikscheiben durch Federn mit einer Federkonstante D ersetzt sind. Der Kreis in der Mitte ist die Schwungmasse M_S . Mechanisch entspricht das linke Modell mit zwei Federn dem Rechten mit einer Feder mit doppelter Federkonstante.

ist äquivalent zu dem rechts dargestellten Aufbau, für den sich folgende Resonanzfrequenz ergibt [Dem15, S. 328]:

$$f_{res,H} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2D}{M_S}} \quad \text{mit} \quad D = \frac{A}{n t s_{33}^E}. \quad (3.14)$$

Dabei bezeichnet D die Federkonstante der Piezokeramikscheiben, A deren Fläche, t deren Dicke und s_{33}^E die Elastizitätskonstante. Der Parameter n beschreibt hierbei die Anzahl der Scheiben auf einer Seite der Schwungmasse.

Der in dieser Arbeit verwendete Hammer-Schallwandler ist in Abb. 3.7(b) skizziert. Er besteht aus den gleichen Komponenten wie der Tonpilz-Aufbau mit vier Piezoscheiben, jedoch sind diese durch eine Schwungmasse in zwei gleichgepolte Paare geteilt, welche gegenpolig zueinander geschaltet sind.



(a) Aufbau eines Standard-Hammer-Schallwandlers: Zwischen Kopf- und Heckmasse ist eine Schwungmasse umgeben von gegenpolig ausgerichteten Piezoscheiben mittels einer Schraube eingespannt. Die Piezoscheiben drücken beim Schwingen die Schwungmasse jeweils in die gleiche Richtung.

(b) Aufbau des in dieser Arbeit verwendeten Hammer-Schallwandlers: Zwischen Schmelzkopf und Heckmasse ist analog zu (a) eine Schwungmasse umgeben von gegenpolig ausgerichteten Piezoscheiben mittels einer Gewindestange und einer Mutter eingespannt. Wie in (a) lassen die Piezos auch hier die Schwungmasse zwischen Schmelzkopf und Heckmasse hin- und herhämtern. Dichtungsringe und elektrische Isolierung sind dabei für das Prinzip der Funktionsweise nicht relevant. [Lin16, adaptiert]

Abbildung 3.7.: Aufbauskizze ohne elektrische Kontaktierung: Links das Standard-Hammer-Design, rechts das in dieser Arbeit verwendete Design

4. Messapparatur und Aufbau der Schallwandler

4.1. Signalgenerierung und Datenerfassung

Alle Messungen im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden im AAL, dem Aachener Akustik Labor, im Physikzentrum der RWTH Aachen durchgeführt. Dort steht ein Windows-PC mit der Software LabVIEW zur Verfügung. Dieser ist über ein Ethernet-LAN mit einem Oszilloskop und einem Funktionsgenerator verbunden. Dabei handelt es sich um ein Oszilloskop des Modells DPO 4034 der Firma Tektronix, das mit vier koaxialen BNC-Anschlüssen eine ausreichende Möglichkeit zur Datenaufnahme bietet. Der hier verwendete Funktionsgenerator ist ein Rigol 5072, welcher in der Lage ist eine Abfolge von Sinus-Burst-Signalen mit bestimmter Frequenz, Spannungsamplitude, Anzahl von Oszillationen pro Sinus-Burst und Abstand zwischen diesen Sinus-Bursts zu generieren. Ein Schema ist in Abb. 4.1 dargestellt.

Zur Aufnahme der Daten wird auf dem Computer ein von Peter Linder in LabVIEW entwickeltes Steuerprogramm verwendet. Dieses kombiniert eine automatisierte Steuerung von Funktionsgenerator und Oszilloskop, indem es ein automatisches Durchfahren eines Frequenzintervalls bei vorher festgelegten Grundeinstellungen zu den oben aufgeführten freien Parametern des Funktionsgenerators und des Oszilloskops ermöglicht. Um eine zeitliche Abstimmung von Signalgenerierung und -erfassung sicherzustellen, wird zusätzlich am Oszilloskop ein Triggersignal vom Funktionsgenerator verwendet. Es werden Sinus-Burst-Signale eingesetzt, da diese den Vorteil bieten, dass im Vergleich zu einem Dauersignal ein besonders präzises Triggeren über das separate, mit jedem einzelnen Burst gesendete Triggersignal des Funktionsgenerators möglich ist. Die Parameter Frequenz, Anzahl der Oszillationen und der Abstand zwischen den einzelnen Burst-Signalen können im LabVIEW-Programm eingestellt werden. In dieser Arbeit werden ausschließlich Sinus-Burst-Signale mit einer Burstdauer von 35 ms und einem Abstand zwischen diesen von 20 ms bei den Messungen zu direkter Ankopplung des Sensors (Kapitel 6) und 50 ms bei den Messungen im Wasserbehälter verwendet (Kapitel 7). Der Messbereich des Oszilloskops wird auf 40 ms bei einer Anzahl 10 000 *samples* eingestellt, wobei ein *Presignal* von 3 ms vor Beginn jedes Sinus-Bursts zur Einschätzung des Rauschens aufgenommen wird.

Auf die Art und Weise, wie und welche Signale mit dem Oszilloskop aufgezeichnet wurden, wird einzeln für die Messungen bei direkter Einkopplung im Abschnitt 6.1 und für die Messungen im Wasser im Abschnitt 7.1 eingegangen.

4.2. Schallwandler

Der Aufbau der in dieser Arbeit benutzten Schallwandler wird auf Basis der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Schallwandler-Konzepte durchgeführt. Bei der Realisierung des Tonpilz-Konzeptes gibt es zwei verschiedene Konfigurationen, eine mit zwei Piezokeramiken und eine mit vier Piezokeramiken.

In Abb. 4.3 sind die beiden Konfigurationen des Tonpilz-Schallwandlers und der Hammer-

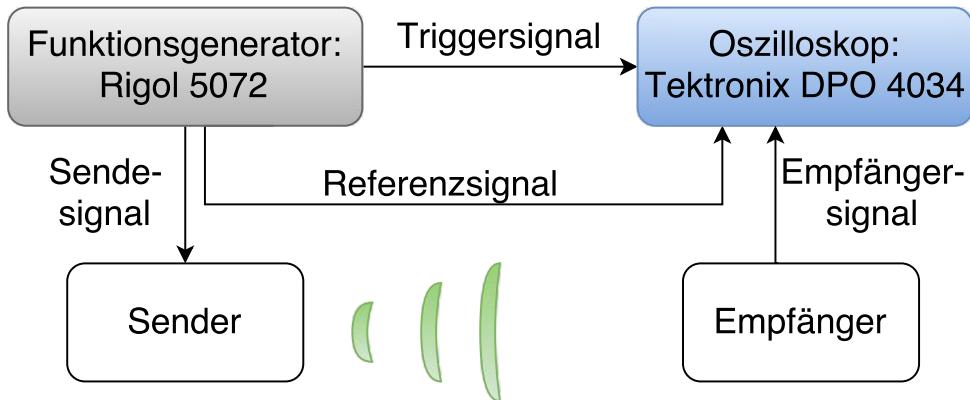


Abbildung 4.1.: Schema der Messapparatur: Der Funktionsgenerator, in diesem Fall ein Rigol 5072, sendet ein Sinus-Burst-Signal an den Sender und ein Referenzsignal an das Oszilloskop. Zusätzlich wird das Oszilloskop durch den Funktionsgenerator getriggert. Als Oszilloskop kommt das Modell DPO 4034 von Tektronix zum Einsatz. Der Empfänger wandelt das akustische Signal des Senders, hier in Grün veranschaulicht, in ein elektrisches Signal, das zum Oszilloskop geleitet wird.

Schallwandler dargestellt und erklärt. Es wird eine M4-Gewindestange in den Schmelzkopf der APU geschraubt. Die Piezokeramiken und Massen besitzen mittig Aussparungen, sodass sie entlang der Gewindestange auf dem Schmelzkopf, dessen Daten in Tabelle 4.1 zusammengefasst sind, gestapelt werden können. Mit einer Mutter kann der Stapel festgespannt werden. Zu beachten ist, dass die Gewindestange bis unterhalb der Mutter elektrisch isoliert sein muss, damit die Spannungskontaktierung funktioniert. Zur Kontaktierung wird mit einer Lötschelle eine Elektrode an die Gewindestange geschraubt, sodass eine leitende Verbindung zum Kopf des Schallwandlers besteht. Diese wird später auf *Ground* gelegt und kontaktiert die Piezokeramiken von unterhalb. Die andere Elektrode wird ebenfalls mit einer Lötschelle direkt oberhalb der Heckmasse angebracht, sodass diese die Piezokeramiken von oberhalb kontaktiert. Mit einer Kunststoffunterlegscheibe wird dafür gesorgt, dass die einspannende Mutter von der darunterliegenden Masse elektrisch isoliert ist und damit die beiden Elektroden nicht leitend verbunden sind. Außerdem ist auf die Polung der Piezokeramiken zu achten. Beim Tonpilz-Schallwandler sind alle Piezoelemente in die gleiche Richtung gepolt, während beim Hammer-Schallwandler die Polung beider Piezoscheiben unterhalb der Schwungmasse in die entgegen gesetzte Richtung im Vergleich zu der Polung der Scheiben oberhalb ist.

Als piezoelektrische Wandler werden scheibenförmige Dickenschwinger von der Firma CeramTec aus dem Werkstoff SONOX P4 verwendet. Sie haben eine Höhe von 2 mm, einen Innendurchmesser von 15 mm und einen Außendurchmesser von 50 mm. Diese Angaben entstammen den Herstellerangaben aus Anhang A.1. Weitere Informationen zu den Eigenschaften der Piezoscheiben sind im Anhang A.1 zu finden. Es werden zwei verschiedene Massen verwendet. Die kleinere der bei-



Abbildung 4.2.: Foto einer verwendeten Piezokeramikscheibe

Material	HOVADUR® CNCS
Gewicht	(3248.0 ± 0.3) g
Dichte	8.84 g/cm ³
Elastizitätsmodul	1.4 GPa
Poissonzahl	0.34
long. Schallgeschwindigkeit v_L	4940 m/s
Höhe	(79.9 ± 0.5) mm
Durchmesser	(80.0 ± 0.5) mm

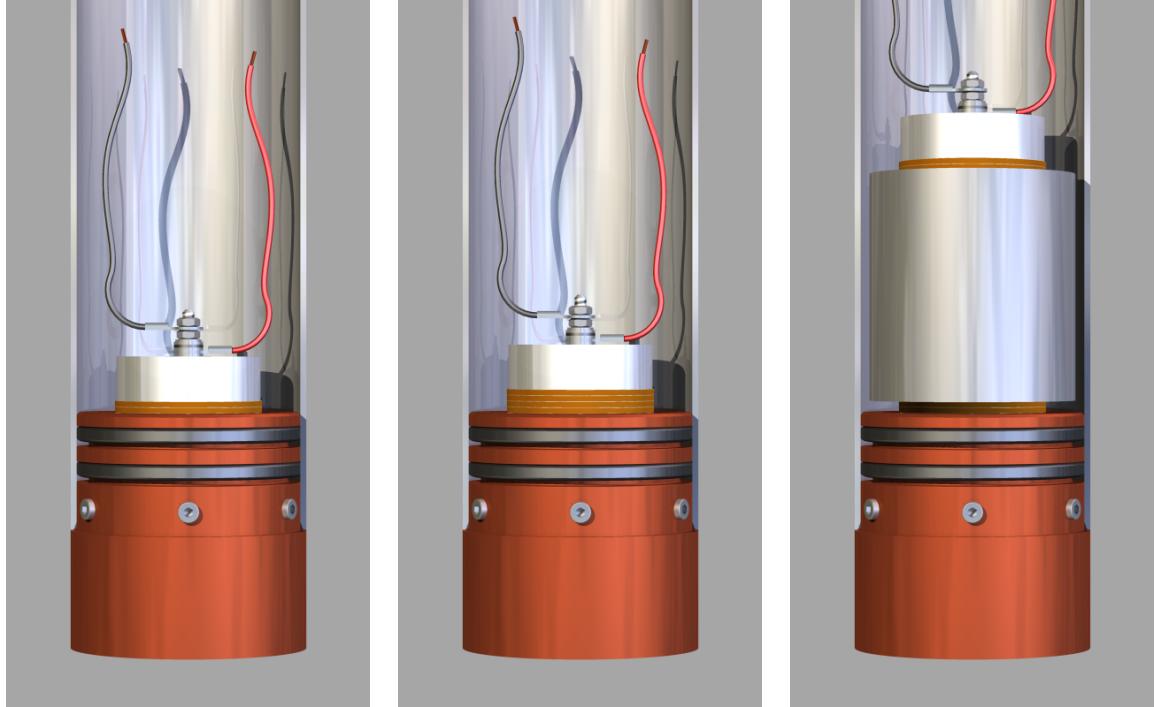
Tabelle 4.1.: Eigenschaften des Schmelzkopfes [14; Bar]

	klein	groß
Material	Aluminium	Stahl
Gewicht	(79.0 ± 0.3) g	(2220.0 ± 0.3) g
Höhe	(15.0 ± 0.5) mm	(75.0 ± 0.5) mm
Innendurchmesser	(5.0 ± 0.5) mm	(5.0 ± 0.5) mm
Außendurchmesser	(49.0 ± 0.5) mm	(69.0 ± 0.5) mm

Tabelle 4.2.: Eigenschaften der Massescheiben [Her16]

den wird stets als Heckmasse benutzt, die größere kommt nur als Schwungmasse im Aufbau des Hammer-Schallwandler zum Einsatz. Die Eigenschaften sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Da sich die beiden Aufbauten durch das Einfügen der großen Schwungmasse stark in ihrer Höhe unterscheiden, wird für die Tonpilz-Konfigurationen eine kürzere Gewindestange verwendet, als für den Hammer-Schallwandler. Aufgrund von Verschleißerscheinungen musste die Gewindestange mehrfach ausgetauscht werden. Schließlich wurde die in den Messungen mit direkter Ankopplung (Kapitel 6) verwendete Gewindestange aus Kohlenstoffstahl durch eine Gewindestange aus dem härteren VA-Stahl im Rahmen der Messungen im Wasserbehälter (Abschnitt 7.1) ausgetauscht.



(a) Tonpilz 2er-Konfiguration (b) Tonpilz 4er-Konfiguration (c) Hammer 4er-Konfiguration

Abbildung 4.3.: Dargestellt sind die drei verschiedenen Aufbauten von Schallwandlern, welche im Rahmen dieser Arbeit für den Einsatz in der APU in Betracht gezogen werden [Lin16]. In (a) ist der Aufbau des Tonpilz-Schallwandlers in der Konfiguration mit zwei Piezokeramikscheiben abgebildet. Der kupferfarbene Schmelzkopf fungiert als Kopfmasse, in welchen eine M4-Gewindestange geschraubt ist. Auf diese sind die zwei in die gleiche Richtung gepolt piezokeramischen Scheiben und darüber die Heckmasse aufgesteckt. Die Gewindestange ist mit einem Schrumpfschlauch elektrisch isoliert. Von oben wird mit einer Mutter der Stapel aus Piezokeramiken und Heckmasse vorgespannt. Mit zwei Elektroden wird die elektrische Kontaktierung der Piezokeramiken vorgenommen. Dazu wird eine der Elektroden unterhalb der Vorspannmutter angebracht und zwischen diesen eine Kunststoffunterlegscheibe zur Isolierung eingefügt. Die Elektrode steht damit in elektrischem Kontakt mit der Heckmasse. Die andere Elektrode ist oberhalb der Vorspannmutter an die Gewindestange geschraubt und damit in leitender Verbindung mit dem Schmelzkopf, auf welchen die Piezokeramiken aufgelegt wurden. Die in der nebenstehenden Grafik (b) dargestellte Tonpilz 4er-Konfiguration entspricht dem beschriebenen Aufbau des Tonpilz-Schallwandlers in Konfiguration mit zwei Piezokeramiken, nur dass an Stelle von zwei Piezokeramiken nun vier solcher gleich-gepolt übereinander gestapelt sind. Der Aufbau des Hammer-Schallwandlers, welcher in (c) abgebildet ist, ähnelt dem des Tonpilz-Schallwandlers mit vier Piezokeramiken. Der Unterschied liegt darin, dass zwischen jeweils zwei Piezokeramiken eine Schwungmasse eingefügt wurde. Zudem sind die piezokeramischen Scheiben unterhalb der Schwungmasse in die entgegengesetzte Richtung gepolt im Vergleich zu den Scheiben oberhalb der Schwungmasse.

5. Entwicklung einer robusten Methodik zur Datenauswertung

Der Vergleich der unterschiedlichen Schallwandlerdesigns in dieser Arbeit erfordert eine Datenauswertung, welche Rückschlüsse auf die Effektivität der Schallwandler bei verschiedenen, vorgegebenen Frequenzen ermöglicht. In Abb. 5.1 ist ein Beispiel der Rohdaten gezeigt, auf deren Basis die in diesem Kapitel vorgestellte Methodik angewandt wird. Es werden stets zwei Signale aufgezeichnet. Diese sind als Referenz das an den Schallwandler angelegte Signal sowie das von der Sensorik gemessene, akustische Signal. In den ersten drei Millisekunden der Aufzeichnung wird noch kein Signal an den Schallwandler gesendet, sodass die Daten in diesem Zeitraum für eine Offsetkorrektur des empfangenen Signals genutzt werden können. Zur weiteren Auswertung wird nur der Anteil zwischen 20-35 ms des insgesamt über 40 ms aufgezeichneten akustischen Signals verwendet, damit der Einschwingvorgang des Schallwandlers zu Beginn jeder Messung nicht einbezogen wird.

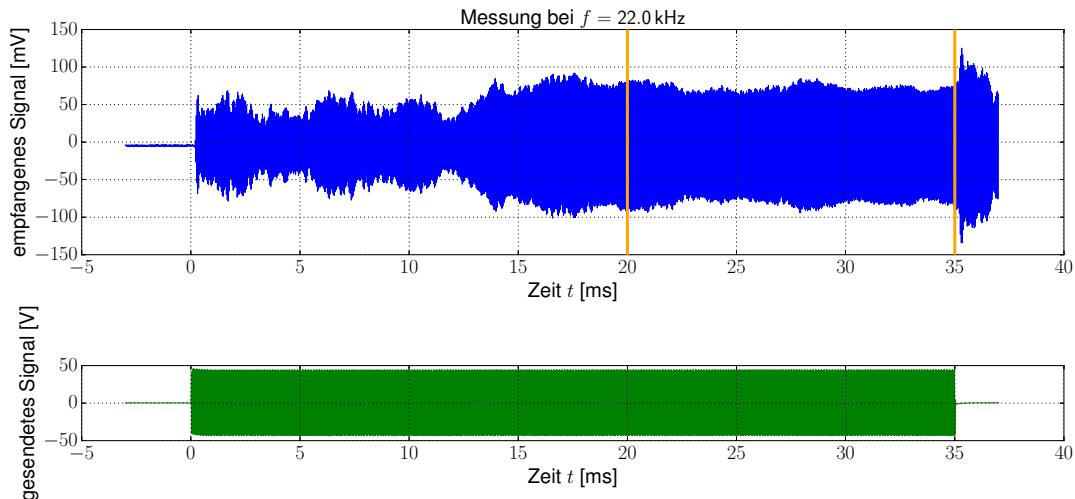


Abbildung 5.1.: Oben ist ein typisches Spannungssignal vom Hydrofon aus einer Messung in Wasser (vgl. Kapitel 7) zu sehen. Durch die orangen Linien ist der Bereich begrenzt, in dem das Signal ausgewertet wird. Davor ist ein Einschwingvorgang zu erkennen, der dann in einen stationären Zustand übergeht. Unten ist das Referenzsignal abgebildet, welches am Schallwandler anliegt.

5.1. Normierung

Da bei der Signalverstärkung nicht immer sichergestellt ist, dass die Amplitude der Sendesignale gleich bleibt, beispielsweise dadurch, dass ein Verstärker Charakteristiken aufweist, wird die Amplitude des Ausgangssignals am Empfänger durch die des Sendesignals normiert.

Im Rahmen der Messungen dieser Arbeit wird von einem linearen Zusammenhang zwischen dem

Sendesignal und dem empfangenen Signal ausgegangen, da mit piezoelektrischen Schallwandlern im linearen Bereich gearbeitet wird und die Abschwächung des Schalls zwischen Sender und Empfänger einen konstanten Faktor ausmacht, weil Abstand und Medium zwischen einzelnen Messungen nicht verändert werden (vgl. Abschnitt 3.1.4).

Zur Normierung reicht es daher aus, die Messwerte des Empfängersignals durch die Maximalamplitude des Sendesignals zu teilen.

5.2. Generieren eines Schätzers auf Basis der spektralen Leistungsdichte

Aus dem Empfängersignal kann die spektrale Leistungsdichte (aus dem Englischen *Power Spectral Density*, kurz PSD) bestimmt werden. Die Vorgehensweise dabei wird im folgenden Kapitel (Abschnitt 5.3) erklärt. Zum Generieren eines Schätzers wird ein festes Intervall Δf symmetrisch um die angelegte Sendefrequenz ausgewählt und innerhalb dieses Intervalls die Werte der spektralen Leistungsdichte nach Vorbild der Riemannschen Summe aufsummiert:

$$S = \sum_{k \in I} PSD(f_k) \cdot [f_{k+1} - f_k] \quad (5.1)$$

mit $I = \{i \in \mathbb{N} : f_0 - \frac{\Delta f}{2} < f_i < f_0 + \frac{\Delta f}{2}\}$

Dieser Ansatz wird gewählt, um auch in dem Falle, dass der maximale Wert der spektralen Leistungsdichte genau zwischen zwei Punkten liegt, einen robusten Schätzer zu gewinnen.

Diese Leistung innerhalb des vorgegebenen Frequenzintervalls um die Sendefrequenz am Empfänger ist aufgrund der linearen Schallwandlung des hier verwendeten Senders proportional zur Schalleistung und ermöglicht daher Rückschlüsse auf die Effektivität des Schallwandlers. Damit ist ein Vergleich der Sender anhand des charakteristischen frequenzabhängigen Verlaufs der Leistung möglich.

5.3. Berechnung der spektralen Leistungsdichte mittels der Welch-Methode

Die Welch-Methode wurde 1967 von Peter D. Welch entwickelt und ist eine Möglichkeit den Wert der spektralen Leistungsdichte abzuschätzen [Wel67]. Nach der Methode wird der Datensatz $X(j)$ mit insgesamt N Einträgen ($j = 0, 1, \dots, N - 1$) zuerst in K kürzere Datensätze $X_k(j)$ aufgeteilt, welche alle die gleiche Länge L besitzen. Zudem können diese sich gegenseitig um D Einträge überlappen.

Über jeden Datensatz $X_k(j)$ wird eine Fensterfunktion $W(j)$ gelegt. Die Idee der Fensterfunktion ist, Artefakte zu verhindern, welche beim Bilden der diskreten Fouriertransformation aufgrund von Diskontinuitäten entstehen. Dies passiert, wenn die Periodizität der Samplingrate von der Periodizität der den Daten zugrunde liegenden Funktion abweicht. Die dadurch geringere Gewichtung der Randbereiche der Segmente, kann durch das Überlappen dieser kompensiert werden [HRS02].

Nach der Multiplikation der Fensterfunktion kann die Diskrete Fouriertransformation, kurz

DFT, für alle K Datensatzausschnitte gebildet werden:

$$DFT_k(n) = \sum_{j=0}^{L-1} X_k(j)W(j)e^{-2\pi i \frac{jn}{L}} \quad (5.2)$$

Danach wird durch Quadrieren des DFT-Betrags und zusätzlichem Normieren mit den Werten der Fensterfunktion für jedes der K -Segmente und der Samplingfrequenz f_S sowie anschließendem arithmetischen Mitteln der Schätzwert für die spektrale Leistungsdichte berechnet:

$$PSD(n) = \frac{1}{K \cdot f_S} \sum_{k=1}^K \frac{|DFT_k(n)|^2}{U}, \quad (5.3)$$

$$\text{wobei } U = \sum_{j=0}^{L-1} W^2(j) \quad (5.4)$$

Die Auflösung der dazugehörigen Frequenzen ergibt sich mit der Samplingfrequenz, mit der der Datensatz $X(j)$ aufgenommen wurde, zu:

$$f_{res} = \frac{f_S}{L} \quad (5.5)$$

5.4. Parameter der Methode

In diesem Abschnitt wird auf die explizite Wahl von Parametern eingegangen, welche zur Auswertung von Daten mit der in den vorherigen Abschnitten 4.1 bis 5.3 erklärten Methode nötig ist. Diese werden während der gesamten Messungen nicht verändert und daher bereits an dieser Stelle erläutert.

5.4.1. Segmentlänge

Wie beschrieben, ist es für die Welchmethode notwendig die Anzahl K der Segmente festzulegen, in welche der Datensatz unterteilt wird (vgl. Abschnitt 5.3). Bei vorgegebener Länge des Datensatzes ist dies äquivalent zur Wahl der Länge L eines Segments.

In den folgenden Kapiteln wird stets mit einer Gesamtzahl von 3750 Datenpunkten gearbeitet. Dies beschränkt die Segmentlänge nach oben. Zusätzlich ist eine möglichst hohe Zahl an Mittelungen erstrebenswert, sodass die Segmentlänge möglichst gering gewählt werden sollte.

Andererseits sinkt jedoch bei geringerer Segmentlänge die Auflösung im Frequenzspektrum der spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density, PSD) nach Gleichung (5.5). Da für eine sinnvolle Auswertung die Frequenzauflösung f_{res} nicht zu grob sein sollte, fordert dies eine möglichst hohe Segmentlänge.

5.4.2. Fensterfunktion und Überlappung

Ein weiterer Parameter der Methode ist die Fensterfunktion. Dafür wird das häufig verwendete *Hanning*-Fenster benutzt, welches definiert ist durch [HRS02]:

$$w(j) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \frac{2\pi \cdot j}{N} \right] \quad \text{mit } j = 0 \dots N - 1 . \quad (5.6)$$

Es wird, wie für dieses Fenster empfohlen, mit einer Überlappung von 50 % gearbeitet.

5.4.3. Intervallbreite

Der letzte festzulegende Faktor dieser Messmethodik ist die Breite des Intervalls, in dem über die spektrale Leistungsdichte aufsummiert wird. Hierbei gilt es einerseits die Intervallgröße so groß zu halten, dass nicht nur die Spitze des Peaks miteinbezogen wird. Andererseits sollte die unnötige Miteinbeziehung des Rauschens bei der Wahl eines zu großen Bereichs minimiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit ist es jedoch sinnvoll das Fenster eher größer zu wählen, da das Rauschlevel einige Größenordnungen unter dem Maximalwert des Peaks liegt.

5.4.4. Wahl der Parameter im Rahmen dieser Arbeit

In dieser Arbeit wurde eine Segmentlänge von 500 gewählt. Dies ergibt 14 Mittelungen und $f_{res} = 500 \text{ Hz}$. Beispielhaft ist in Abb. 5.2 eine Messung des in Kapitel 6 verwendeten Aufbaus gezeigt. Dort ist die spektrale Leistungsdichte eines realen Signals dargestellt. Diese hat ein flaches Rauschen sowie einen deutlichen, über mehrere Größenordnungen ausgeprägten Peak und eignet sich damit gut als Grundlage für einen robusten Schätzer.

Es wird als Intervallbreite $\Delta f = 2 \text{ kHz}$ verwendet. Der Bereich, über den summiert wird, ist in Abb. 5.2 durch die roten Linien gekennzeichnet und umschließt dort gut den Peak.

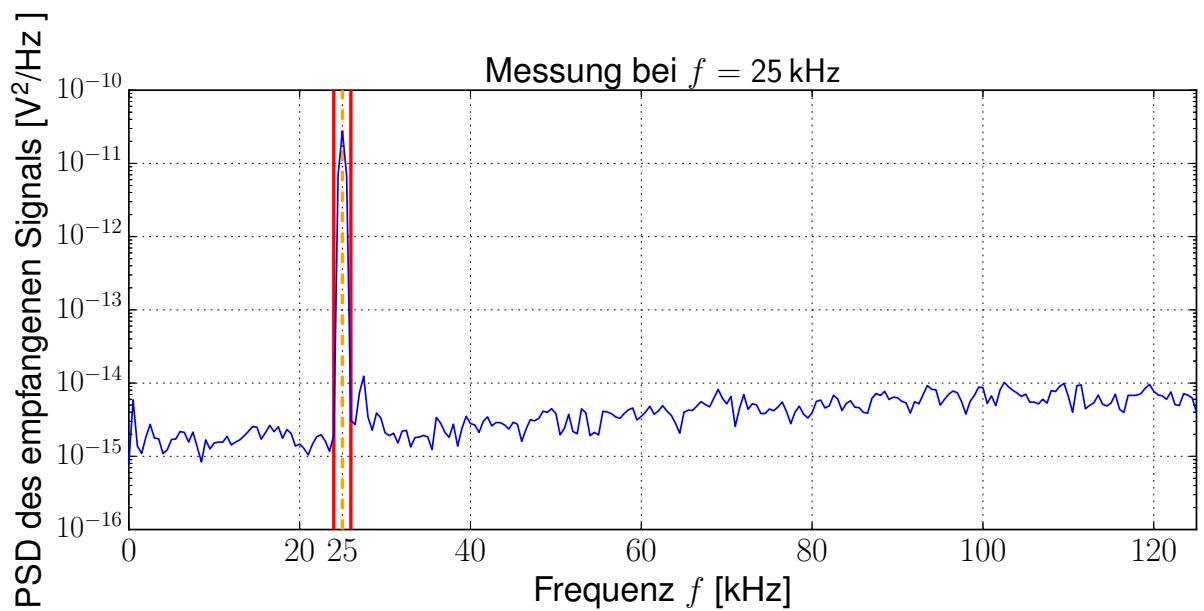


Abbildung 5.2.: Spektrale Leistungsdichte des empfangenen Signals einer Messung bei direkter Einkopplung mit einer Tonpilz 2er-Konfiguration (vgl. Kapitel 6) bei 25 kHz. Es ist gut zu sehen, dass der Peak des Signals einige Größenordnungen über dem flachen Rauschen liegt. Die roten Linien zeigen den Bereich von 2 kHz, in dem über die Werte aufsummiert wird.

6. Messungen bei direkter Ankopplung des Sensors

In einer vorangehenden Bachelorarbeit untersuchte Christoph Herbert bereits die hier betrachteten Emitterdesigns vor allem im Bezug auf die Dimensionierung der Massen [Her16]. Die Messungen zum Resonanzverhalten der jeweiligen Emitter bestätigten jedoch nicht die theoretischen Überlegungen zur Lage von Peaks, die aufgrund von Resonanzen des mechanischen Systems entstehen sollten. Die Reproduzierbarkeit der Messdaten erwies sich als schwierig, da bereits kleine Änderungen im Aufbau des Emitters oder der Position des Sensors einen großen Effekt auf die Messwerte hatten. Zusammenfassend konnte keine Auswahl zwischen den Emittertypen getroffen werden.

Im Rahmen der Messungen von Christoph Herbert konnten die Auswirkungen des Anziehdrehmoments, mit welchem die Mutter auf der Gewindestange die Komponenten des Emitteraufbaus zusammenhält, nicht analysiert werden. Das motiviert eine Betrachtung in dieser Arbeit. Der dazu verwendete Messaufbau wird im folgenden Abschnitt 6.1 beschrieben. Zwar konnte mit diesem Aufbau eine Messreihe mit sukzessive verändertem Anzieh-Drehmoment am Emitteraufbau aufgenommen werden, jedoch erwies sich dies nicht als zielführend für den Vergleich der Emittertypen in Bezug auf den Einsatz als Signalgeber für das akustische Lokalisierungsnetzwerk. Das wird im darauf folgenden Abschnitt 6.2 diskutiert.

6.1. Aufbau

Ziel des in diesem Kapitel verwendeten Versuchsaufbaus ist es die vom Schallwandler emitierte Leistung bei direkter Einkopplung in einen Sensor zu messen. Dazu wird die im Abb. 6.1 dargestellte Struktur verwendet. Der Aufbau von Computer, Oszilloskop und Funktionsgenerator entspricht dem in Kapitel 4 Beschriebenen. Dann wird zum einen das Signal des Funktionsgenerators als Referenz am Oszilloskop aufgezeichnet, zum anderen durchläuft es die Tonpilz 2er-Konfiguration (vgl. Abschnitt 4.2). Dabei liegt der Schallwandler direkt auf dem akustischen Sensor auf. Der dafür verwendete Sensor besteht aus *Polyvinylidenfluorid*, kurz PVDF, und wurde in einer früheren Bachelorarbeit von Sarah Böhm hergestellt [Böh11]. Der PVDF-Sensor besitzt die Form einer rechteckigen Elektronikplatine mit den Maßen $70\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ [Her16]. Zur elektrischen Isolierung wird zusätzlich noch eine Kunststofffolie zwischen Sensor und Schallwandlerkopf gelegt. Der gesamte Aufbau ist auf einem Labortisch mit einer typischen Arbeitsplatte als Auflage aufgebaut. Insbesondere liegt der PVDF-Sensor bei den Messungen direkt auf der Arbeitsplatte auf. Der Effekt der Unterlage wurde in einer im folgenden Abschnitt 6.2 vorgestellten Messung untersucht. Das vom PVDF-Sensor aufgenommene Signal wird dann ebenfalls am Oszilloskop aufgezeichnet.

Die freien Parameter bei der Messaufnahme sind die Samplingrate, der Messbereich der Spannungsmessung bei Funktionsgenerator und PVDF-Sensor, das aufgenommene Zeitintervall und die Anzahl der Mittelungen, welche bereits vom Oszilloskop durchgeführt werden.

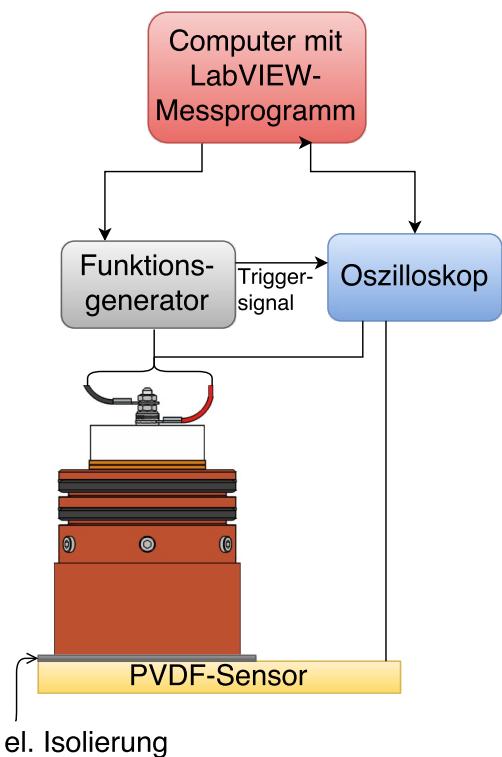


Abbildung 6.1: Versuchsaufbau zu Messungen der Tonpilz 2er-Konfiguration bei direkter Ankopplung des PVDF-Sensors an den APU-Kopf und damit an die Kopfmasse des Schallwandlers: Ein Funktionsgenerator schickt eine Abfolge von Sinus-Burst-Signalen an den Schallwandler. Der Kopf des Schallwandlers ist auf dem PVDF-Sensor platziert, wobei eine Plastikfolie zur elektrischen Isolierung den Sensor vom Kopf trennt. Das Signal des PVDF-Sensors wird von einem Oszilloskop aufgezeichnet, wobei zudem das Ausgangssignal des Funktionsgenerators als Referenz mitgespeichert wird. Der Messprozess wird durch ein LabVIEW-Messprogramm auf einem Windows PC gesteuert. Die Datenverbindung zu Funktionsgenerator und Oszilloskop geschieht über Ethernet-LAN.

6.2. Vormessungen zur Evaluation der Sensitivität

Im Wesentlichen können die Messungen bei direkter Ankopplung bestätigen, dass die im Kapitel 5 beschriebene Messmethodik, sowie die Elektronik zur Signalgenerierung und Datenerfassung funktionieren, jedoch stellt sich das Konzept der Messung bei direkter Ankopplung des Sensors an den Schallwandler als nicht zielführend für den Vergleich von Schallwandlerdesigns zum Einsatz in Eis heraus. Einerseits besitzt der Aufbau des Schallwandlers an sich ein Resonanzverhalten, welches sensitiv auf kleine Veränderungen reagiert und daher bereits durch eine leichte Ungenauigkeit beim Zentrieren der Piezokeramiken oder einen Wechsel der Gewindestange – welche im Verlauf der Arbeit mehrfach wegen Verschleißes ausgetauscht werden musste – gewisse Schwankungen im Resonanzverhalten auftreten. Darüber hinaus lässt sich der Schallwandlerkopf nicht optimal auf dem PVDF-Sensor platzieren: Die runde Grundfläche des Wandlerkopfes überragt die Auflagefläche des Sensors deutlich (vgl. Anhang A.2). Damit eine plane Auflage des Kopfes auf dem Sensor gewährleistet ist, muss zudem der Kopf etwas hinter den Kontakten des Sensors positioniert werden. Dies führt dazu, dass leichte Verschiebungen des Kopfes auf der Sensorfläche zu unbekannten Systematiken in den Messdaten führen.

In Abb. 6.2 ist beispielhaft ein Plot zweier Leistungsspektren gezeigt. Beide wurden mit demselben Schallwandleraufbau, sowie den gleichen Messeinstellungen mit Ausnahme der Anzahl der Mittelungen am Oszilloskop aufgezeichnet. Das sind bei Messung A 64 und bei Messung B 512 Mittelungen. Die Verläufe der Intervallleistung unterscheiden sich teilweise deutlich: Im Bereich von 10-17 kHz wechseln sich die Ausschläge der beiden Messungen ab, sodass die Messwerte bis zu drei Größenordnungen (bei ca. 14 kHz) voneinander entfernt liegen. Bei einem Anstieg der Intervallleistung über eine höhere Bandbreite, wie beispielsweise im Bereich von 18-20 kHz oder um ca. 22 kHz, decken sich die Daten bis auf Einzelausschläge.

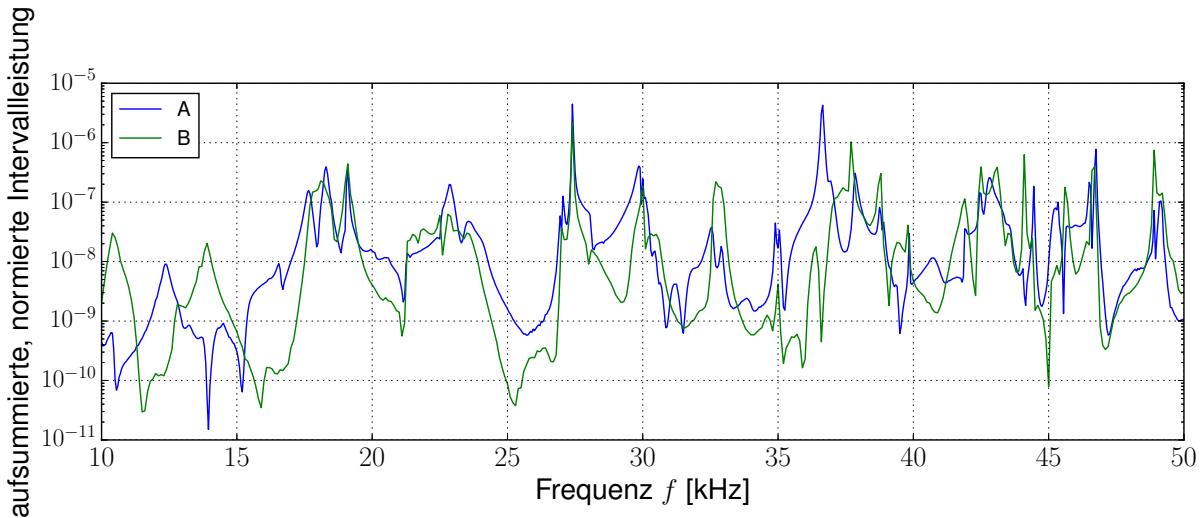


Abbildung 6.2.: Der Vergleich der beiden Verläufe zeigt deutliche Differenzen auf. Im Bereich unterhalb von 18 kHz wechseln sich die Ausschläge der Kurven ab und weisen Unterschiede in den Werten von bis zu drei Größenordnungen wie bei ca. 14 kHz auf. Auch im weiteren Verlauf tritt dies auf, beispielsweise bei ca. 37 kHz. Es gibt aber auch Abschnitte in denen sich die beiden Verläufe bis auf schlanke Peaks sehr ähnlich sind, wie beispielsweise bei 18-20 kHz, zwischen 22 kHz und 24 kHz, sowie oberhalb von 38 kHz.

Die Messungen zeigen, dass ein Vergleich von Schallwandlerdesigns in diesem Rahmen nicht auf Basis von einzelnen Resonanzpeaks gestützt werden kann, da diese mitunter mit hohen und vor allem kompliziert einzuschätzenden Messunsicherheiten behaftet sind. Einen besseren Anhaltspunkt bieten Charakteristika, welche sich über weitere Frequenzabschnitte im Verlauf der Kurve zeigen.

Zur Untersuchung, welchen Einfluss die Unterlage des PVDF-Sensors hat, werden drei Resonanzspektren aufgenommen. Bei der ersten Messung ist der PVDF-Sensor direkt auf der Arbeitsplatte aufgebaut. In der zweiten und dritten Messung werden zwei verschiedene Schaumstoffunterlagen, gekennzeichnet mit „A“ und „B“, und letztlich eine schwere, feste Masse, in Form eines weiteren APU-Schmelzkopfes, mit einem Stück Schaumstoff darauf als Unterlage des Sensors verwendet. Fotos davon befinden sich in Anhang A.2. Die Ergebnisse sind in Abb. 6.3 dargestellt. Insgesamt besitzen die verschiedenen Verläufe eine ähnliche Charakteristik, da Peaks meist in allen vier Kurven an den gleichen Stellen erkennbar sind. Im Plot wurden diese Stellen mit einer durchgezogenen Linie zur Übersicht markiert. Es fällt allerdings auf, dass die Höhe der normierten, aufsummierten Intervalleistung Differenzen von bis zu zwei Größenordnungen aufweist, was bei 9 kHz der Fall ist. An dieser Stelle weist der Messwert, welcher mit Schaumstoffstück A als Unterlage aufgezeichnet wurde, mit einer Größenordnung von 10^{-8} den höchsten Wert auf. Der Wert, welcher mit der Arbeitsplatte als Unterlage aufgezeichnet wurde, liegt in der Größenordnung 10^{-10} und ist am kleinsten. Die Messwerte mit Schaumstoffstück B als Unterlage – mit Masse darunter und ohne – liegen auf der selben Höhe bei ca. 10^{-9} . Auch bei dem darauf folgenden Peak bei 19 kHz weist die Messung mit Schaumstoffstück A als Unterlage den höchsten Wert auf. Jedoch ist nun der Wert der Messung mit Arbeitsplatte nicht mehr am geringsten und die Werte der Messungen mit Schaumstoffstück B unterscheiden sich. Auch im

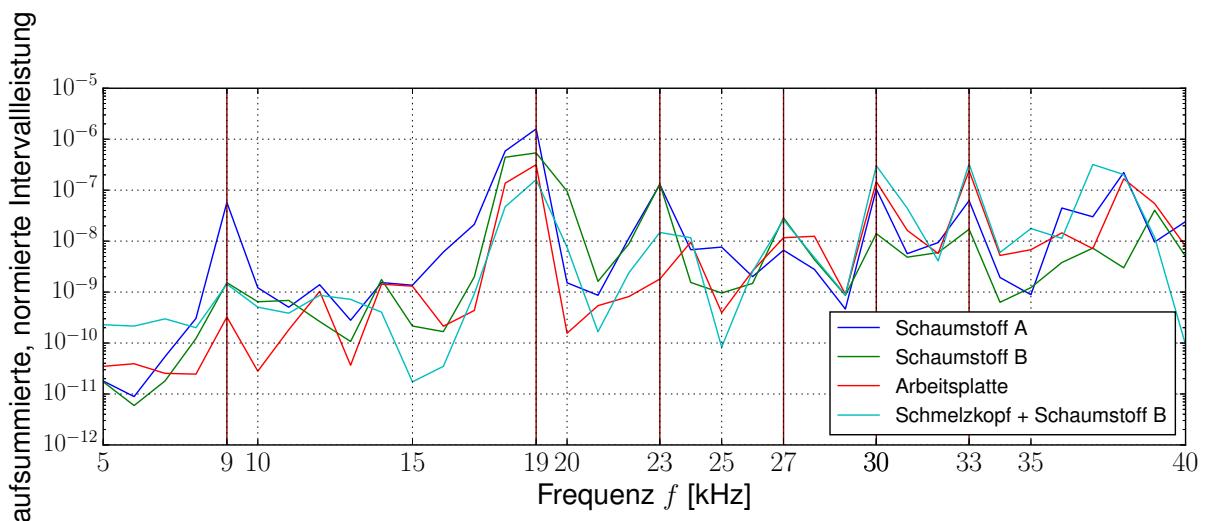


Abbildung 6.3.: Dieser Plot zeigt den Einfluss der PVDF-Sensor-Unterlage. Es werden ein Vergleich zwischen zwei verschiedenen Schaumstoffstücken, „A“ und „B“, der Kombination aus APU-Schmelzkopf und darunter liegendem Schaumstoffstück „B“, sowie der Arbeitsplatte als Unterlage gezogen. An den hohen Diskrepanzen der Messwerte wird deutlich, dass die Unterlage einen deutlichen Einfluss auf die Höhe der im Sensor gemessenen Intervallleistung nimmt. Dieser Einfluss äußert sich in einer frequenzabhängigen Systematik. Diese sieht man beispielsweise im Verlauf der Messwerte mit Schaumstoff „A“, welcher im Bereich vor 23 kHz besonders hohe Werte im Vergleich zu den anderen Verläufen besitzt, jedoch bei höheren Frequenzen, insbesondere zwischen 26-35 kHz, vergleichsweise niedrige Messwerte aufweist.

weiteren Verlauf weisen die Messwerte bei Ausschlägen hohe Diskrepanzen auf. Hinzu kommt, dass der Verlauf der Messung mit Schaumstoffstück A im Bereich 7-26 kHz allgemein höhere oder maximal gleich hohe Messwerte wie der Verlauf der Messung mit der Arbeitsplatte als Unterlage besitzt, während im nachfolgenden Bereich von 26-35 kHz dies umgekehrt ist. Alles in allem zeigt die Variation der Unterlage bei sonst gleichen Messbedingungen, dass diese einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der Intervallleistung hat und der Verlauf sich je nach Unterlage mit einer anderen Systematik über das Frequenzband ändert. Die Lage markanter Ausschläge hingegen war bei allen Unterlagen dieselbe.

6.3. Analyse von Intervallleistungsspektren bei verschiedenen Anziehdrehmomenten und Belastungsanalyse

In Abb. 6.4 sind die Intervallleistungsspektren bei fünf verschiedenen Anziehdrehmomenten an der Mutter, welche den Aufbau des Schallwandlers zusammenhält, in zwei verschiedenen Frequenzbereichen dargestellt. Es wurden Messungen mit einem Anziehdrehmoment von 1-3 N m in 0.5 N m-Schritten aufgezeichnet, wobei in Tabelle 6.1 die zugehörigen Messeinstellungen aufgelistet sind. Die Aufspaltung des Frequenzbereichs liegt daran, dass bei den Datensätzen zu 1 N m und zu 2.5 N m Anziehdrehmoment jeweils zwei Datensätze – einer für den Bereich unterhalb von 19 kHz und der andere für den Bereich darüber – aus praktischen Gründen aufgenommen werden mussten. Die anderen Datensätze konnten durchgehend aufgezeichnet werden.

6. Messungen bei direkter Ankopplung des Sensors

Name der Messung	Mittelungen	Auflösung
1.0 N m, unterer Frequenzbereich	512	200 Hz
1.0 N m, oberer Frequenzbereich	64	100 Hz
1.5 N m	512	50 Hz
2.0 N m	128	100 Hz
2.5 N m, unterer Frequenzbereich	512	200 Hz
2.5 N m, oberer Frequenzbereich	64	100 Hz
3.0 N m	512	100 Hz

Tabelle 6.1.: Einstellungen zu den Messungen der Intervallleistungsspektren bei verschiedenen Anziehdrehmomenten. Die zugehörigen Plots finden sich in Abb. 6.4.

Die Messungen zeigen, dass das Anziehdrehmoment einen Einfluss auf den Kurvenverlauf hat. Besonders im Bereich niedriger Frequenzen, das heißt unterhalb von 25 kHz, haben die Kurvenverläufe wenig Ähnlichkeit miteinander. Dabei lässt sich jedoch keine systematische Veränderung in Bezug auf das sukzessive Ändern des Anziehdrehmoments feststellen, womit keine klare Aussage getroffen werden kann, welche Einstellung für den Einsatz des Schallwandlers am sinnvollsten ist.

In einer separat mithilfe des CAD-Programms *Autodesk® Inventor®* von Peter Linder angefertigten Belastungsanalyse des APU-Schmelzkopfes konnten mögliche Resonanzfrequenzen ermittelt werden. Dabei wurde die Simulation auf Basis der in Tabelle 4.1 aufgeführten Material- und Geometrieeigenschaften des Schmelzkopfes durchgeführt. In Abb. 6.4 sind diese Frequenzen als gestrichelte Linien eingezeichnet. Ein Vergleich, mit den bei verschiedenen Anziehdrehmomenten am Versuchsaufbau ermittelten Daten, ermöglicht kein Identifizieren von Peaks der Intervallleistungsspektren mit Resonanzfrequenzen, welche in der Belastungsanalyse gefunden wurden. Das Verständnis der Kurvenverläufe im Rahmen dieser Messungen kann damit nur durch wesentlich aufwendigere Methoden, wie beispielsweise einer Analyse mit der Finite-Elemente-Methode erreicht werden.

Insgesamt erweist sich das Prinzip der Messung bei direkter Ankopplung als unvorteilhaft für den weiteren Vergleich der Schallwandlerarten. Weitere Analysen der Schallwandlerdesigns und deren Konfigurationen, welche schließlich innerhalb einer geschlossenen Schmelzsonde in das Medium Eis eine möglichst hohe Leistung bei niedriger Frequenz einkoppeln sollen, sollten nicht auf Basis von Messungen geschehen, bei welchen die Wechselwirkung des Schallwandlers mit dem Rest der Schmelzsonde, sowie dem Übergang von Schallwandler zu Medium vernachlässigt werden. Dies lässt sich insbesondere durch die hohen systematischen Unterschiede stützen, welche beim Vergleich von verschiedenen Unterlagen des bisher verwendeten PVDF-Sensors auftraten. Auch Probleme bei Reproduktionsversuchen, welche sich auf Verschiebungen des PVDF-Sensors unter dem Schmelzkopf zurückführen lassen, werden durch eine Messung mit anderer Sensorkonstruktion vorgebeugt. Die Vergleichsmessungen zum freien Parameter Anziehdrehmoment deuten auf eine Abhängigkeit der Intervallleistungsspektren besonders im Frequenzbereich unterhalb von 25 kHz hin. Die Systematik hinter diesen Veränderungen konnte allerdings nicht erkannt werden.

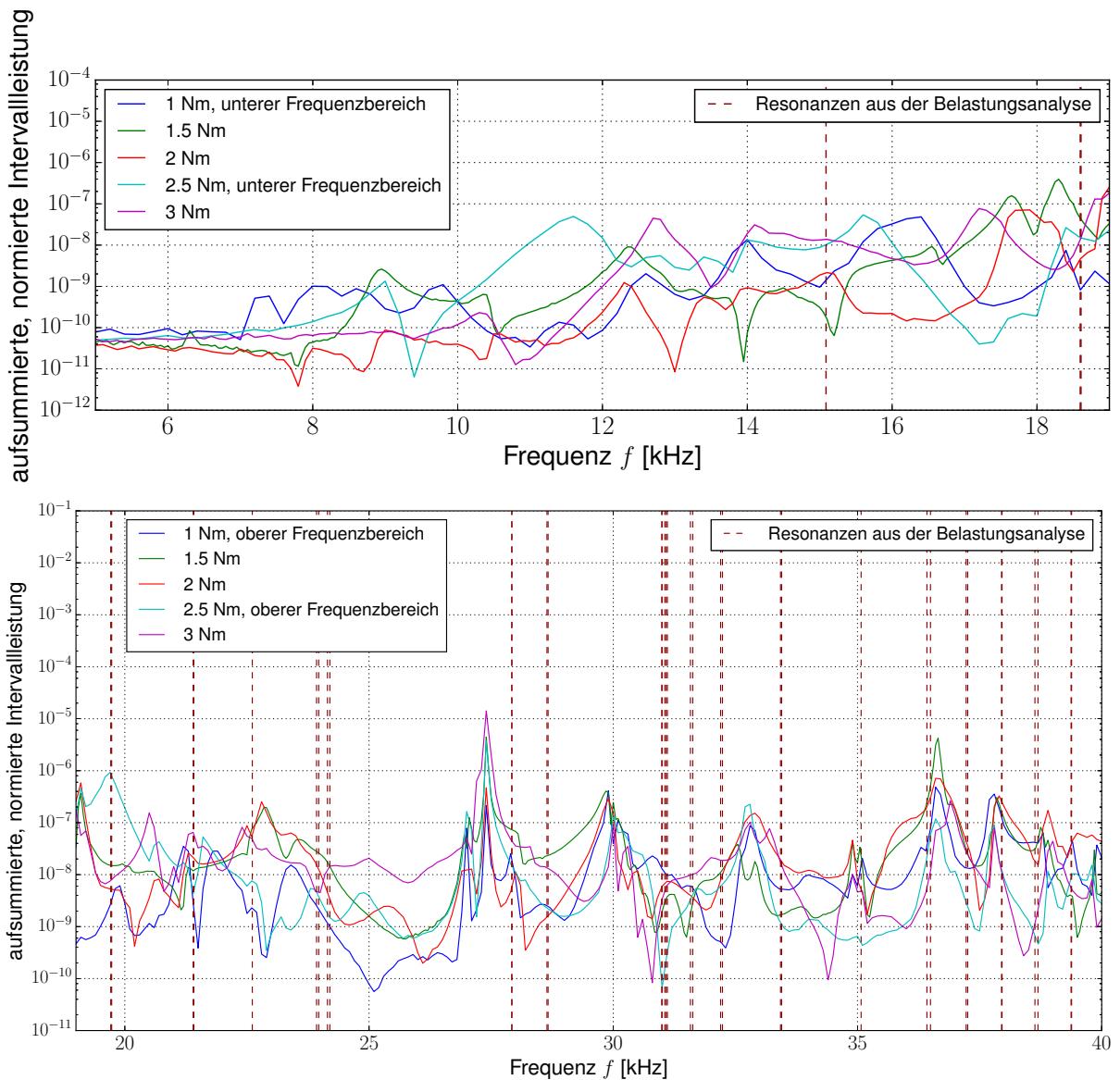


Abbildung 6.4.: Im oberen Plot sind die jeweiligen Intervallleistungsspektren zu den Anziehdrehmomenten 1-3 N m in 0.5 N m-Schritten für den Frequenzbereich 5-19 kHz eingezeichnet, in der Grafik darunter das Gleiche für den Frequenzbereich zwischen 19-40 kHz. Zusätzlich sind mit gestrichelten Linien die mit einer Belastungsanalyse simulierten Resonanzfrequenzen des Schmelzkopfes markiert.

7. Messungen in Wasser

Als Alternative zum in Kapitel 6 vorgestellten und analysierten Messaufbau bietet sich die Verlegung der Messung in einen Wasserbehälter an, in welches der Schallwandler – integriert in die APU – und ein Hydrofon eingetaucht werden. Die Messung erfolgt dann in ähnlicher Weise, welche die spätere Anwendung des Schallwandlers als Signalgeber für Schmelzsonden in Gletschereis vorsieht: Das akustische Signal wird durch den Schallwandler innerhalb der APU erzeugt, in den Wasserbehälter eingekoppelt und schließlich vom Hydrofon gemessen. Eine Messung innerhalb eines Eisblocks, welche noch besser die späteren Einsatzbedingungen des Schallwandlers nachahmen könnte, wird zunächst nicht in Betracht gezogen, da das Integrieren der Messgeräte deutlich aufwendiger ist und zudem bei Messungen in Wasser mehr Flexibilität gewährleistet ist, da der Aufbau zügig darin bewegt und verändert werden kann.

In diesem Kapitel geht es um den Messaufbau zur Aufnahme von Resonanzspektren in Wasser sowie die Durchführung der Messung. Dabei wird auf die Komponenten des Aufbaus und deren Eigenschaften eingegangen und es wird beschrieben, mit welchen Mitteln speziell in Wasser ein robuster Schätzer für das frequenzabhängige Sendevermögen einer Schallwandlerkonfiguration generiert wird. Schließlich werden Messungen vorgestellt, welche Aufschluss über die Messgenauigkeit im Rahmen dieses Aufbaus geben.

7.1. Aufbau der Messung im Wasserbecken

Die Struktur des Messaufbaus ist in Abb. 7.1 skizziert. Dabei ist die Signalgenerierung und Datenerfassung wie in Kapitel 4 beschrieben realisiert. Es wird mittels des Funktionsgenerators ein Sinus-Burst-Signal erzeugt und durch eine Trigger-Verbindung die Signale am Oszilloskop synchronisiert aufgezeichnet. Der Vorgang wird mit einem LabVIEW-Steuerprogramm kontrolliert, welches in den Messungen aus Kapitel 6 bereits benutzt wurde.

In dem hier verwendeten Aufbau wird das Signal vom Funktionsgenerator durch einen Audioverstärker verstärkt, auf dessen Charakteristik in Abschnitt 7.2 eingegangen wird. Das Signal dient nach der Verstärkung durch den Audioverstärker als Sendesignal für den Schallwandler und wird zusätzlich als Referenz aufgezeichnet.

Der zu charakterisierende Schallwandler ist für diese Messungen in die in Abschnitt 2.2 beschriebene reduzierte Form der APU, bestehend aus dem Schmelzkopf, dem Außenzyylinder und dem Heckabschluss mit Befestigungshaken, integriert. Die verschiedenen Schallwandler-Typen sind in Abschnitt 4.2 beschrieben. Über eine Schnur und einen Karabiner ist die APU am Befestigungshaken am Heck an einer Trägerkonstruktion aufgehängt. Die flexible Befestigung mit einem Seil sorgt dafür, dass Trägerkonstruktion und APU mechanisch möglichst wenig gekoppelt sind. Die APU taucht mindestens 10 cm in den Wasserbehälter hinein, sodass der Kopf komplett unter Wasser ist und möglichst nur dorthin Schall einkoppelt. Es wird auch darauf geachtet,

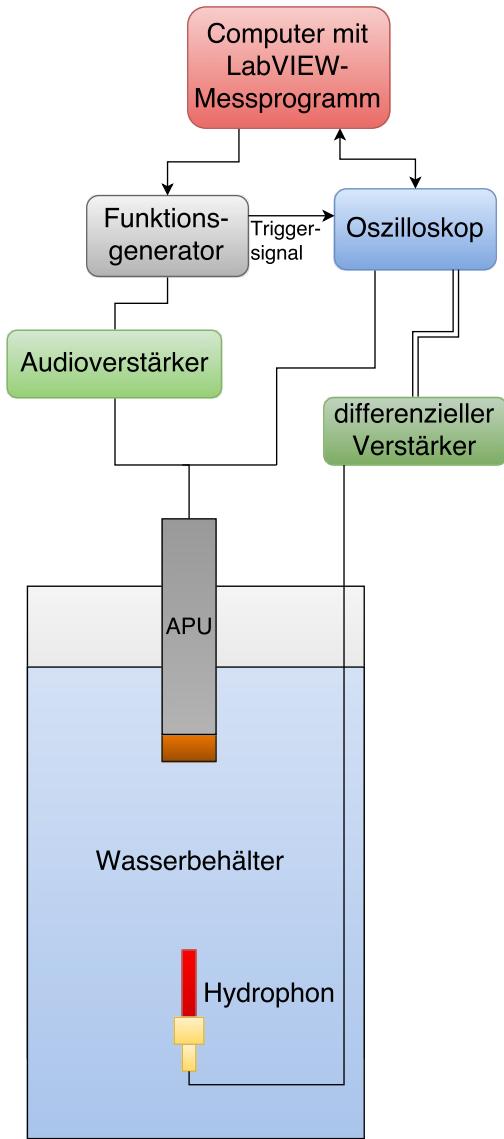


Abbildung 7.1: Schematische Skizze des Versuchsaufbaus zu Messungen verschiedener Konfigurationen der Schallwandler im Wasserbehälter. Das LabVIEW-Messprogramm auf dem Computer steuert den Funktionsgenerator, dessen Signal im Audioverstärker verstärkt wird und dann in den Schallwandler in der APU eingespeist wird. Die APU hängt im Wasserbecken über dem Hydrofon, dessen Signal mit einem differenziellen Verstärker verstärkt wird. Das Oszilloskop zeichnet synchronisiert durch das Triggersignal des Funktionsgenerators das verstärkte Signal vom Audioverstärker sowie vom differenziellen Verstärker auf. Dann überträgt es die Daten per Ethernet-LAN an den Computer.

dass sich keine Luftblasen an der APU sammeln. Zur Messung des von der APU gesendeten Schalls wird ein Hydrofon der Firma RP acoustics e.K. verwendet. Das zeichnet sich durch eine im Bereich von 10-50 kHz nahezu lineare Wandlung von Schalldruck in Spannung aus, besitzt allerdings eine Richtungsabhängigkeit. Ein Foto ist in Abb. 7.2 abgebildet und Kalibrationskurven finden sich im Anhang A.1.

Das Hydrofon wird am gleichen Trägersystem wie die APU in einem einstellbaren Abstand darunter befestigt. Das Trägersystem besteht aus Aluminium-Profilen der Firma Item, welche aufgrund eines integrierten Schienensystems leicht gegeneinander verschoben werden können. Das Trägersystem ermöglicht zudem ein Variieren der Höhe des gesamten Systems aus APU und Hydrofon bei konstantem Abstand zwischen diesen Komponenten. Dies ist besonders für das in Abschnitt 7.4 diskutierte Verfahren der Positionsvariation von Bedeutung.

An das Hydrofon lässt sich ein Koaxialkabel über eine metallische Verschraubung anschließen. Zur Befestigung des Hydrofons am Profil des Trägersystems wird dieses an der metallischen Verschraubung mit dem Koaxialkabel in Schaumstoff eingespannt und mit Kabelbindern an zwei am Trägersystemprofil befestigten Schrauben fixiert.

Das verwendete Wasserbecken ist ein nach oben geöffneter Kunststoffzylinder mit einem Durchmesser von ca. 50 cm und einer maximalen Füllhöhe von ca. 80 cm. Es besitzt zwei sich gegenüberliegende Löcher mit einem Durchmesser von ca. 10 cm, welche mit Plastikkappen abgedichtet wurden, sowie eine etwa $15 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$ große plane Fläche, welche am Boden in die Mantelfläche eingearbeitet wurde. Deren Auswirkungen auf die Akustik im Vergleich zu einem ideal-zylindrischen Becken werden jedoch als nicht relevant eingestuft. Gefüllt ist das Becken mit Leitungswasser. Damit sich die Position der APU im Becken einfach variieren lässt, ist das ganze Becken beweglich auf einem Rollbrett gelagert. Zur Veranschaulichung wurden Details des Aufbaus im Anhang A.3 fotografisch dokumentiert.

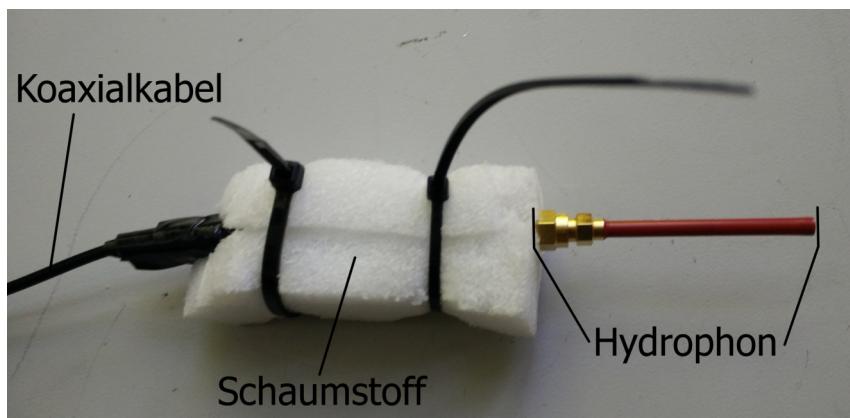


Abbildung 7.2.: Das bei den Messungen in Wasser verwendete Hydrofon RP 27 I der Firma RP acoustics e.K., eingespannt in die Schaumstoffummantelung zur Befestigung am Trägersystemprofil.

Das mit dem Hydrofon aufgezeichnete Signal wird außerhalb des Wasserbeckens mit einem Vorverstärker verstärkt und in ein differenzielles Signal gewandelt. Dies bietet den Vorteil, dass der Messbereich des Oszilloskops besser ausgenutzt werden kann. Da das Signal in ein invertiertes und ein nicht-invertiertes Signal aufgeteilt wird, aus denen dann die Differenz gebildet

wird, werden auf dem weiteren Kabelweg induzierte Störungen im Nachhinein herausgerechnet und sind somit unbedenklich. Der Vorverstärker arbeitet linear im Bereich von 1.6-200 kHz. Ein Datenblatt befindet sich im Anhang A.1.

7.2. Charakteristik des Audioverstärkers

Im Rahmen dieses Versuchsaufbaus sind höhere Sendeleistungen des Schallwandlers nötig als in den Messungen bei direkter Ankopplung des Sensors an den Schallwandler. Dies hängt damit zusammen, dass der Schallwandler Schall näherungsweise kugelförmig in das Wasserbecken einkoppelt. Das Hydrofon deckt mit einer sensitiven Fläche von weniger als einem Quadratzentimeter nur einen sehr kleinen Teil der Fläche ab, auf die die Schallleistung verteilt wird. Die höhere Schallleistung wird durch die Verstärkung des Sendesignals mit einem Audioverstärker erreicht. Dazu wird ein PA-4040 von der Firma Monacor verwendet. Von vier verfügbaren Kanälen wird der zweite Kanal in den Messungen verwendet. Damit wird das Signal auf die Größenordnung von mehreren 10 V angehoben.

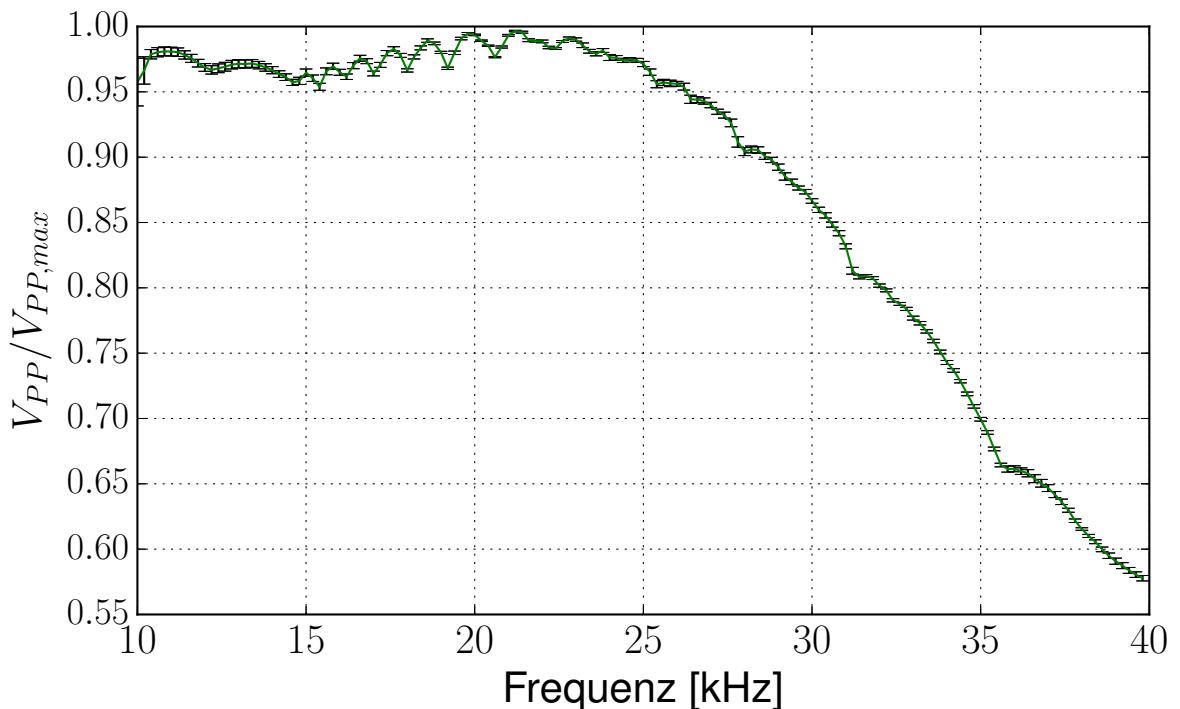


Abbildung 7.3.: Aufgetragen ist die Peak-zu-Peak-Leistung V_{PP} des Audioverstärkers, normiert mit dem höchsten Einzelmesswert $V_{PP,max}$, der bei den Messungen aufgezeichnet wurde, gegen die Frequenz des Eingangssignals. Es wurden 29 Messungen gemittelt und der Fehler durch den Mittelwertfehler eingezeichnet. Die Frequenzcharakteristik verläuft im Bereich zwischen 10-25 kHz mit nur leichten Schwankungen im Bereich von 0.95-1 und fällt dann auf unter 0.6 ab.

In Abb. 7.3 ist die Frequenzcharakteristik des Verstärkers dargestellt. Der Verlauf wurde als Mittelwert aus 29 Datensätzen berechnet, in denen das Sendesignal des Verstärkers aufgezeichnet wurde. Die Charakteristik ist ausgezeichnet durch einen nahezu konstanten Verlauf zwischen 10-25 kHz, welcher dann allerdings stetig abfällt und bei 40 kHz um mehr als ein Drittel gesunken ist. Die dadurch erforderliche Normierung der Messungen ist in der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Auswertungsmethodik implementiert. Zusätzlich geht mit der Verstärkung eine Veränderung der Signalform einher. Diese ist in Abb. 7.4 beispielhaft für ein Sinus-Burst-Signal mit 20 Oszillationen gezeigt und erklärt. Durch die Auswertung auf Basis der spektralen Leistungsdichte, können diese Verzerrungen vernachlässigt werden.

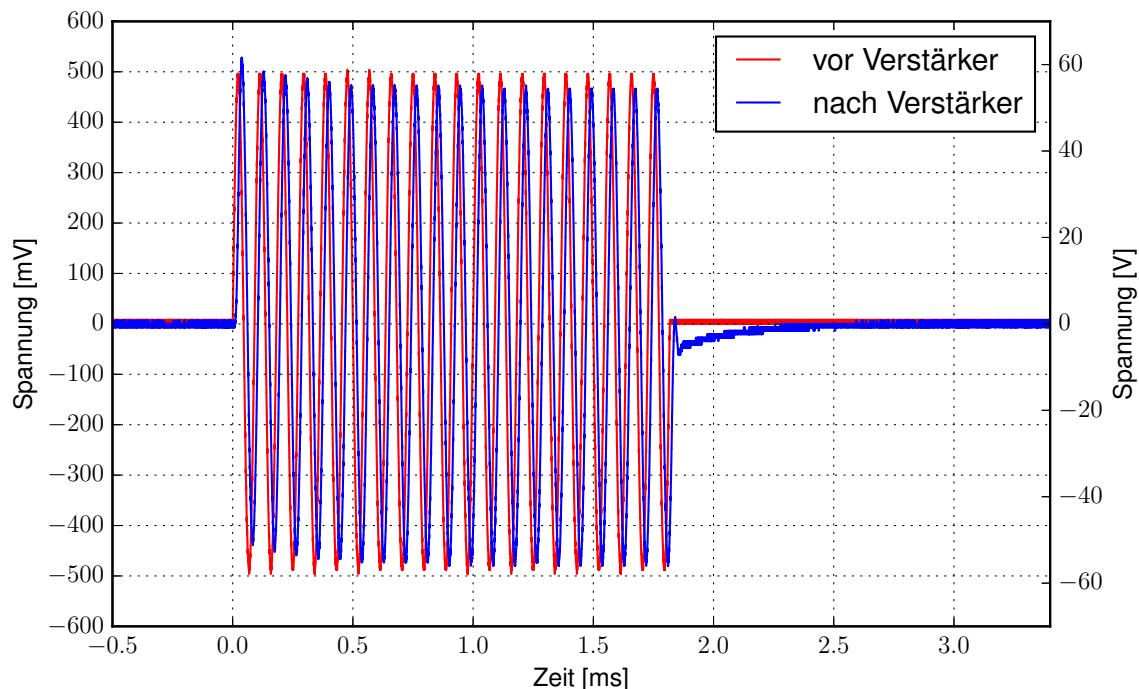


Abbildung 7.4.: Ein Sinus-Burst-Signal mit 20 Oszillationen ist vor und nach der Verstärkung in Rot (original) und Blau (verstärkt) dargestellt. Auf der Ordinate ist linksbündig die Skala der Spannung des unverstärkten Signals und rechtsbündig die des verstärkten Signals aufgetragen. Es fällt auf, dass die Spannung zu Beginn des Bursts bei der Verstärkung leicht nach oben verschoben wird, dieser Effekt allerdings im Laufe des Bursts verschwindet. Zusätzlich fällt das verstärkte Signal mit Ende der letzten Oszillation nur langsam ab. Diese Verzerrungen können aber im Rahmen der Auswertung auf Basis der spektralen Leistungsdichte, welche in Kapitel 5 erläutert ist, vernachlässigt werden.

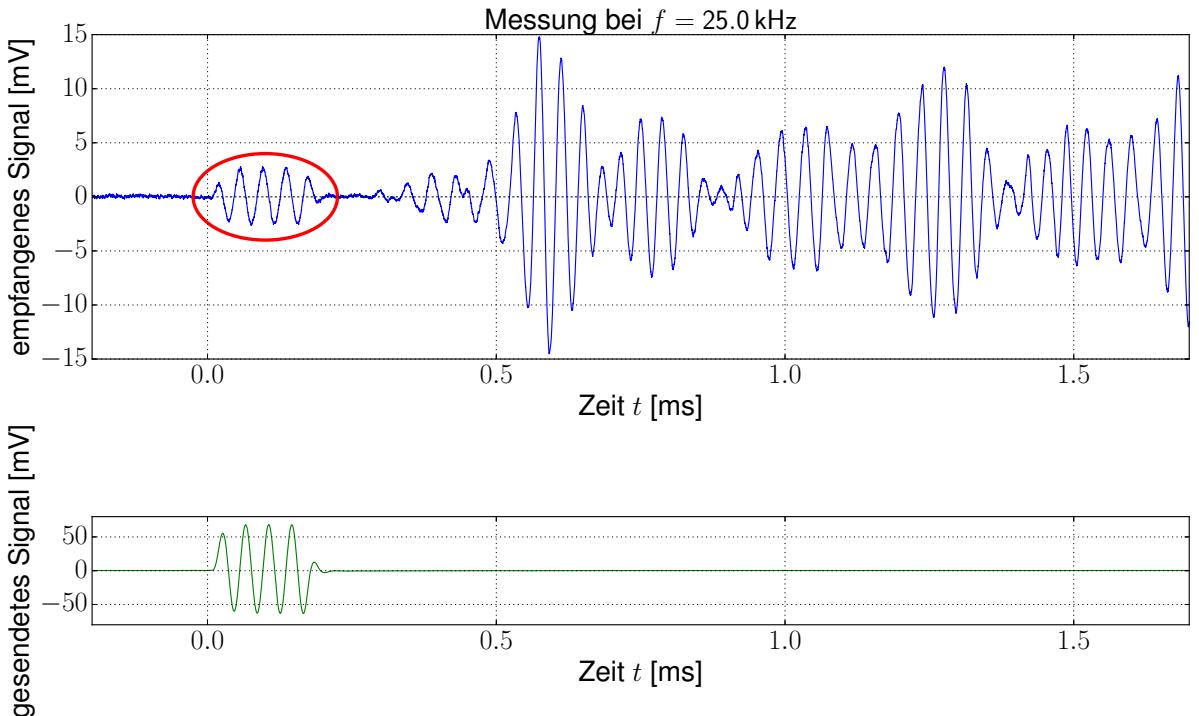


Abbildung 7.5.: Elektromagnetische Störung bei Messung im Wasserbecken: Oben ist das empfangene Signal beim Messaufbau zur Untersuchung der elektromagnetischen Störung dargestellt. Unten sieht man das Sendesignal des Verstärkers. Beide Graphen haben die gleiche Zeitachse. Mit der roten Ellipse ist die Störung markiert, die aufgrund fehlender Laufzeit nicht akustisch sein kann. In dieser Messung ist der Aufbau bereits wie in Abschnitt 7.3 beschrieben geschirmt und geerdet. Da jedoch nur ein sehr kurzes Signal gesendet wird, koppelt der Schallwandler noch nicht mit voller Intensität ein, sondern befindet sich noch im Einschwingvorgang.

7.3. Elektrische Störung und Schirmung

Bei den Messungen im Wasserbehälter tritt neben den akustischen Signalen vom Hydrofon auch eine Störung im Signal auf, deren Eigenschaften auf eine elektromagnetische Ursache hindeuten. Diese Störung wird näher untersucht, indem die APU-Hydrofon-Trägerkonstruktion auf eine Seite des Beckens verschoben und dann das Hydrofon aus seiner Halterung genommen, zum Boden gerichtet und auf Höhe der APU-Unterseite auf der anderen Seite des Beckens befestigt wird (vgl. Abb. A.5 in Anhang A.4). Dann wird nur ein sehr kurzes Signal gesendet, sodass sich Störung und das akustische Signal durch dessen Laufzeit auftrennen lassen. In Abb. 7.5 ist eine so aufgezeichnete Messung bei 25 kHz zu sehen. Mit der roten Ellipse ist die Störung markiert. Deren Frequenz ist die Gleiche wie die des gesendeten Signals. Dies führt besonders bei der Überlappung der Signale bei längeren Sendesignalen zu Interferenzen, die die Messung signifikant beeinflussen.

Da das Störsignal nahezu direkt einsetzt, kann es sich um kein akustisches Signal handeln, da ein solches eine wesentlich größere Laufzeit besitzen würde. Dies wird auch durch die in Abb. 7.6 gezeigte Messung unterstützt, wo bei konstanter Frequenz die Position von APU und Hydrofon stark variiert wird. Auch hier wird nur ein Signal von kurzer Dauer gesendet, sodass die Störung

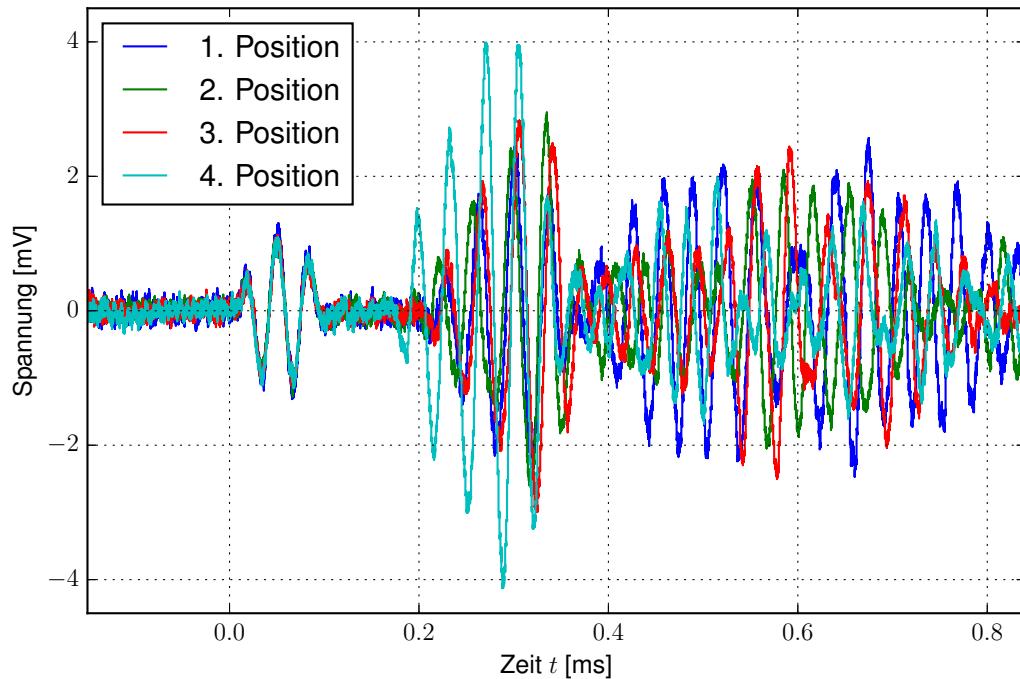


Abbildung 7.6.: Unabhängigkeit der elektromagnetischen Störung von der Position im Becken: APU und Hydrofon werden bei gleichem Abstand im Wasserbehälter an verschiedenen Stellen montiert. Die Störung im Bereich von 0-0.1 ms bleibt nahezu unverändert, während sich die akustischen Signale ab ca. 0.2 ms deutlich verändern.

von den akustischen Signalen isoliert betrachtet werden kann. Es ist gut zu sehen, dass sie nicht von der Position abhängt und im Vergleich zu den akustischen Signalen kaum variiert.

Da bei den Messungen stets über mindestens 128 Messungen gemittelt wird, lässt sich auch eine externe Quelle ausschließen, da deren Effekte durch das Mitteln nur eine Rolle spielen könnten, wenn sie mit der Triggerfrequenz periodisch auftreten würden. Das ist sehr unwahrscheinlich. Auch die Tatsache, dass das Störsignal sowohl die gleiche Frequenz als auch die gleiche Anzahl an Oszillationen hat wie das gesendete Signal, legt den Schluss nahe, dass die Ursache in der signalerzeugenden Elektronik liegt. Eine mögliche Übertragung des Schalls über das Trägersystem durch die höhere Schallgeschwindigkeit im Metall lässt sich ebenfalls ausschließen, da dort der Schall bei ca. 5000 m/s über eine Strecke von rund 1.5 m immer noch eine Laufzeit von 0.3 ms benötigen würde. Abgesehen davon ist die akustische Kopplung von Hydrofon und Trägersystem durch die Schaumstoffummantelung abgeschwächt.

Werden das gesendete Signal und die empfangene Störung genauer untersucht, so ist eine Phasenverschiebung von ungefähr 90° zu erkennen. Außerdem nimmt die Amplitude der Störung mit der Frequenz linear zu. Dies zeigt der Plot in Abb. 7.7. Das spricht für eine kapazitive Kopplung zwischen Sender und Empfänger, da sobald am Sender die Spannung U_0 anliegt und der Empfänger über einen Widerstand R_E geerdet ist, die Spannung am Empfänger gegeben ist durch [Eli16]:

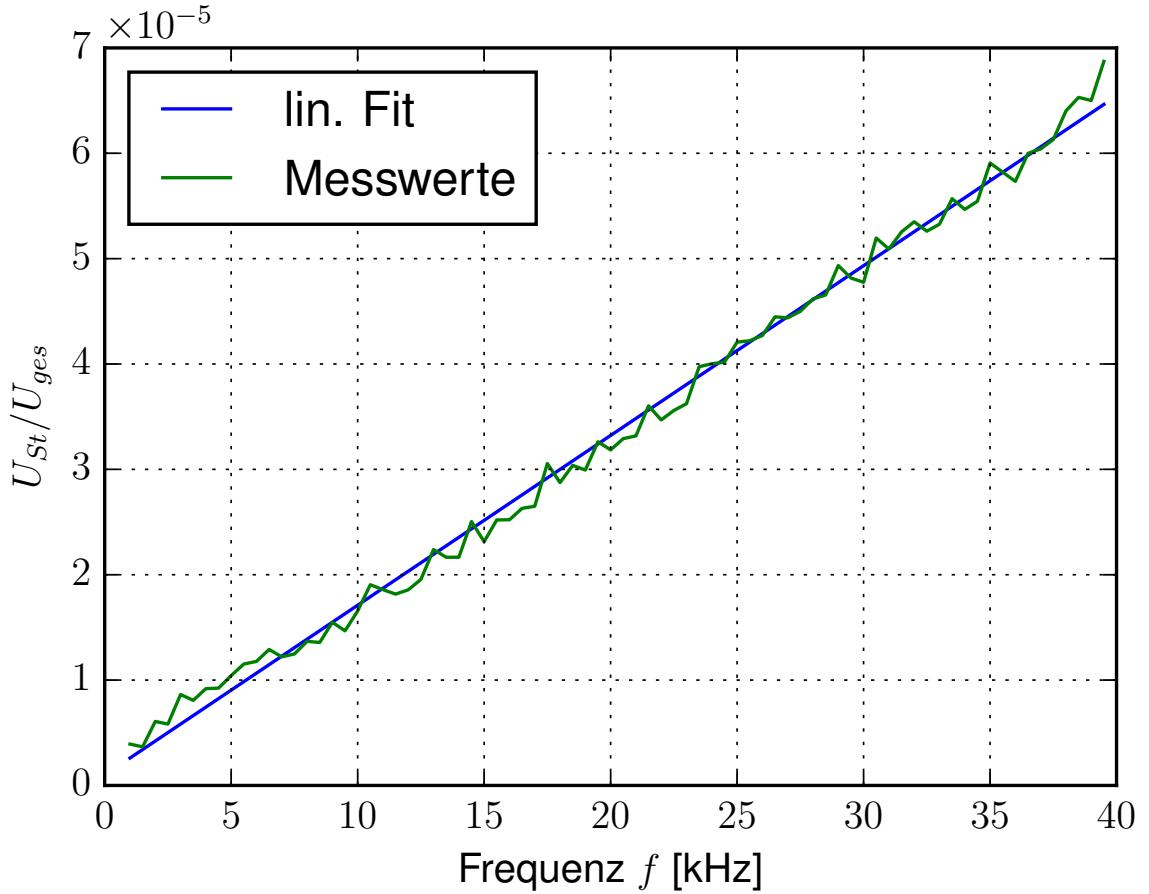


Abbildung 7.7.: Lineare Abhängigkeit der Amplitude des Störsignals von der Sendefrequenz: Die Amplitude des Spannungssignals der Störung U_{St} wird normiert mit der Amplitude des gesendeten Signals U_{ges} , um die Frequenzabhängigkeit des Verstärker zu korrigieren. Diese Größe zeigt einen linearen Verlauf in Abhängigkeit von der Frequenz des gesendeten Signals, was auf eine kapazitive Kopplung zwischen Sender und Empfänger hinweist.

$$\left| \frac{U_E}{U_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_E}{\omega C}\right)^2 + 1}} \stackrel{\frac{R_E}{\omega C} \gg 1}{\approx} \omega \frac{C}{R_E} \quad (7.1)$$

Für große Widerstände sowie kleine Kapazitäten C der Kopplung und kleine Frequenzen entspricht dies einem linearen Zusammenhang zwischen Spannung am Empfänger und der Sendefrequenz.

Um die Störung so gut wie möglich einzudämmen wird die gesamte Elektronik zur Signalerzeugung in eine geerdete Aluminiumkiste gesetzt. Diese ist lediglich nach oben geöffnet, sodass eine Abschirmung bezüglich direkter elektromagnetischer Abstrahlung der Elektronik in Richtung des außerhalb platzierten Oszilloskops oder des Hydrofons sowie dem Verbindungskabel beider besteht. Außerdem wird darauf geachtet, dass das Kabel, durch das das Sendesignal vom

Verstärker zur APU geleitet wird, ein geschirmtes Koaxialkabel ist, sodass dessen elektromagnetische Abstrahlung minimiert wird. Sogar der Stecker wurde mit Aluminiumfolie geschirmt (vgl. Abb. A.6 in Abb. A.6). Insbesondere wird auch für das Verbindungskabel von Hydrofon und Oszilloskop ein Koaxialkabel verwendet. Lediglich die metallische Außenhülle des Hydrofons im Wasser lässt sich nicht abschirmen. Insgesamt wird darauf geachtet, dass alle Geräte das gleiche *Groundlevel* besitzen, also sorgfältig geerdet sind.

Des Weiteren nimmt auch die Intensität der elektromagnetischen Störung mit der Intensität des gesendeten Signals zu, sodass durch Erhöhung der Amplitude des gesendeten Signals der Effekt nicht vernachlässigbar klein wird. Unter der Annahme, dass die elektromagnetische Störung hauptsächlich im Kabel nach dem Hydrofon entsteht, erscheint es sinnvoll, den differenziellen Verstärker direkt an das Hydrofon anzubringen. Dann würde das akustische Signal wesentlich verstärkt werden, bevor die Störung hinzukommt. Dazu wäre es allerdings nötig, das abgedichtete Koaxialkabel am Hydrofon abzuschneiden. Da dies das Spezialkabel unbrauchbar für andere Messungen machen würde, scheidet diese Möglichkeit aus.

Um nach den hier beschriebenen Maßnahmen einschätzen zu können, in welchem Umfang die Störungen noch berücksichtigt werden müssen, wird bei den Messungen jeweils das Verhältnis von Störsignal zu akustischem Signal bestimmt. Dazu wird als einfacher Schätzer für die Amplitude das Quadratische Mittel (Root Mean Square, RMS) benutzt. Dies wird im Bereich von 0-0.1 ms für das Störsignal ausgewertet, da das erste akustische Signal nach einer Laufzeit von ca. 0.1 ms erwartet wird. Für das Signal wird das RMS für den auch zur Auswertung im Allgemeinen benutzten Bereich von 20-35 ms gebildet. Der Quotient aus diesen beiden Werten wird dann bei jeder Frequenz für verschiedene Positionen im Wasserbehälter (vgl. Abschnitt 7.4.1 zur Positionsvariation) berechnet und es wird der Median gebildet. Der Median wird aufgrund seiner Robustheit gegenüber einzelnen, stark abweichenden Messwerten benutzt. Dazu passend werden die als Gauß'sche Perzentile bezeichneten Perzentile gebildet, in denen wie in der Standardabweichung der Gaußverteilung 68.3 % der Werte liegen.

Dies ist in Abb. 7.8 für die Tonpilz 2er-Konfiguration dargestellt. Da diese Konfiguration bei Frequenzen unterhalb von 18 kHz nur ein sehr geringes Signal erzeugt, ist dort der Einfluss der elektromagnetischen Störung besonders groß. Bei Frequenzen über 15 kHz ist der Effekt jedoch im Bereich von rund fünf Prozent oder weniger und damit vernachlässigbar gegenüber den Schwankungen der Amplitude über mehrere Größenordnungen durch die Sendecharakteristik des Schallwandlers.

Der in Abb. 7.9 dargestellte Verlauf des Anteils der elektrischen Störung am eigentlichen Messwert der Tonpilz 4er-Konfiguration ist dem Verlauf der 2er-Konfiguration sehr ähnlich. Dort liegt der Anteil der Störung jedoch schon ab ca. 14 kHz nur noch bei rund fünf Prozent oder weniger und kann vernachlässigt werden. Vorher ist der Anteil sogar teilweise noch höher als bei der 2er-Konfiguration.

Der Anteil der elektrischen Störung am eigentlichen Messwert des Hammer-Schallwandler zeigt hingegen auch bei kleinen Frequenzen ein höheres Sendesignal als die beiden Tonpilzdesigns, wodurch auch der in Abb. 7.10 dargestellte Verlauf über den ganzen Frequenzbereich im Bereich von unter fünf Prozent beziehungsweise bei fünf Prozent um ca. 12 kHz liegt. Daher lassen sich die elektromagnetischen Störungen nach den Schirmungsmaßnahmen komplett vernachlässigen.

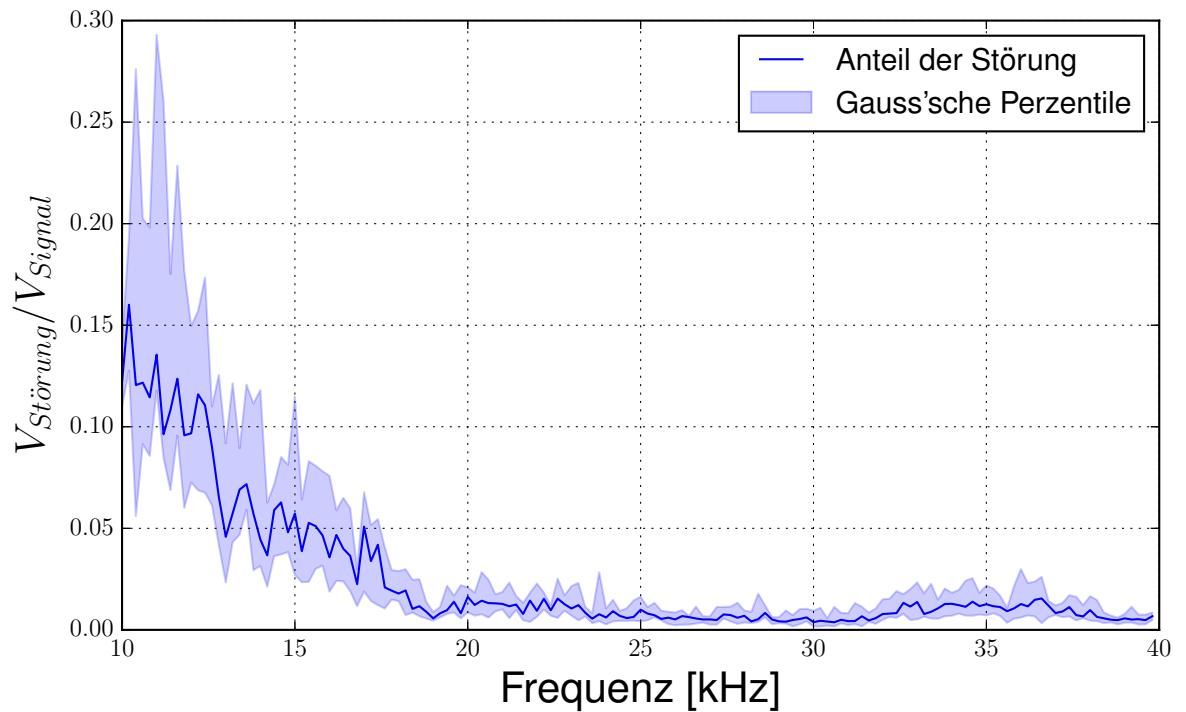


Abbildung 7.8.: Anteil der elektromagnetischen Störung bei der Tonpilz 2er-Konfiguration mit geschirmtem Aufbau: Dargestellt ist der Median über verschiedene Positionen im Wasserbehälter aus den Quotienten der Amplitude des Störsignals $V_{Störung}$ und der des ausgewerteten Signals V_{Signal} .

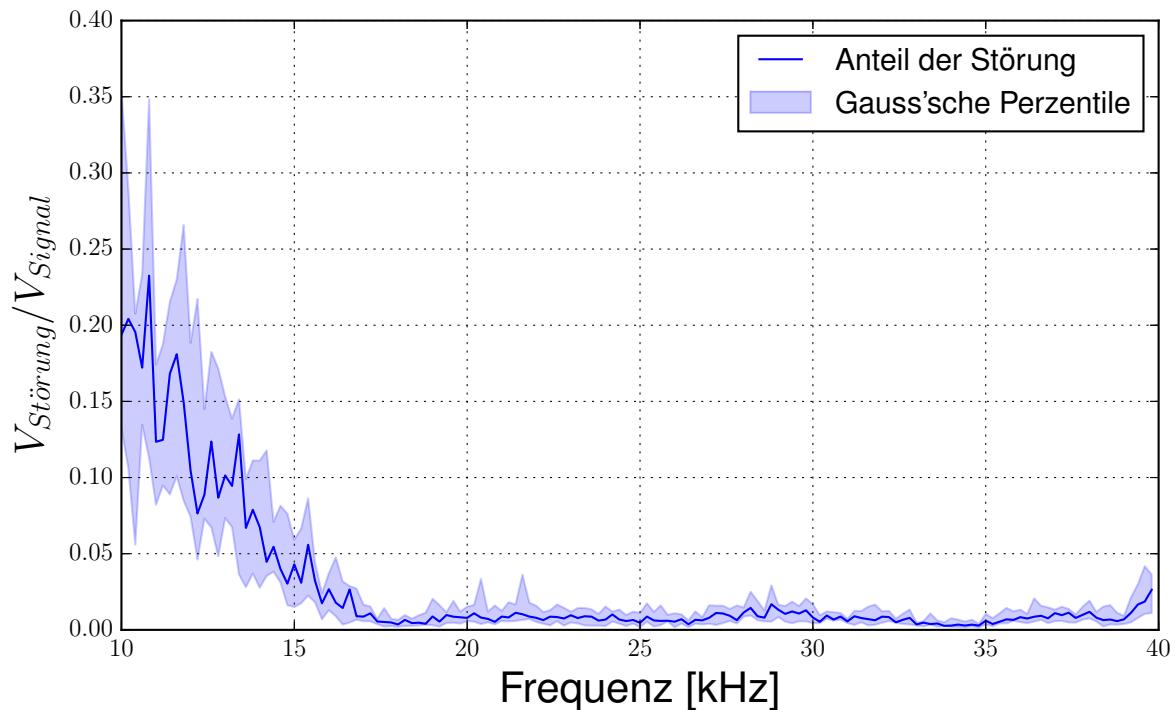


Abbildung 7.9.: Anteil der elektromagnetischen Störung bei der Tonpilz 4er-Konfiguration mit geschirmtem Aufbau: Dargestellt ist der Median über verschiedene Positionen im Wasserbehälter aus den Quotienten der Amplitude des Störsignals $V_{Störung}$ und der des ausgewerteten Signals V_{Signal} .

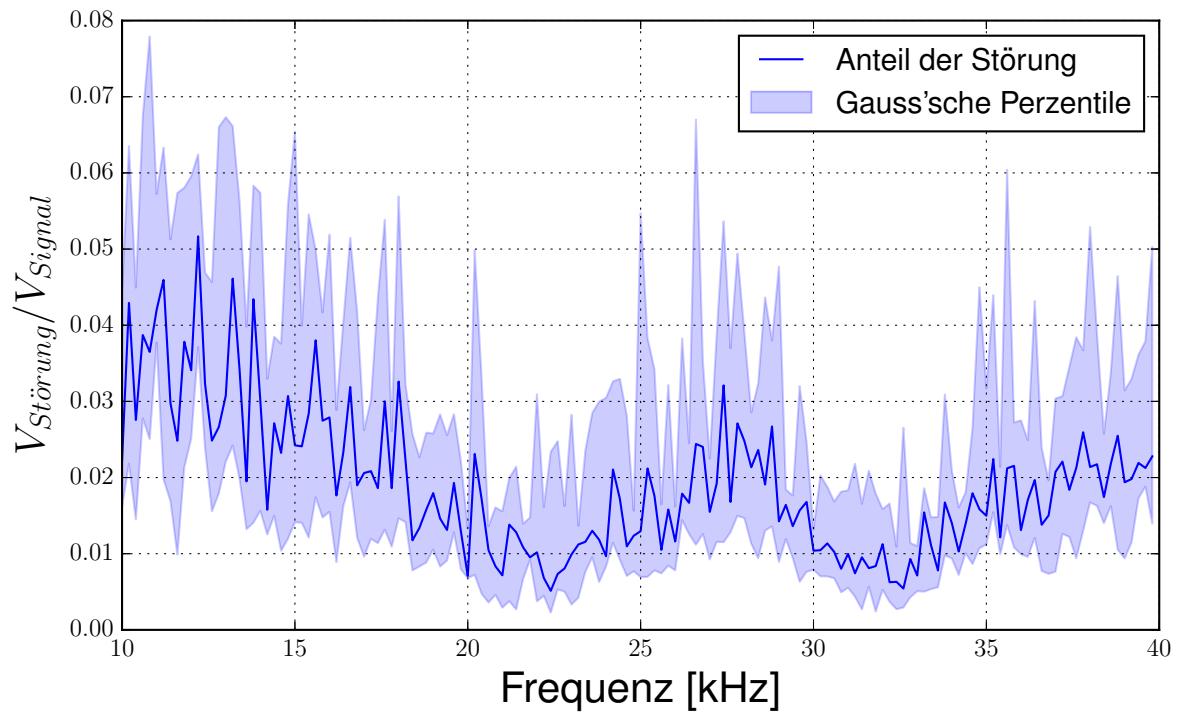


Abbildung 7.10.: Anteil der elektromagnetischen Störung beim Hammer-Schallwandler mit geschirmtem Aufbau: Dargestellt ist der Median über verschiedene Positionen im Wasserbehälter aus den Quotienten der Amplitude des Störsignals $V_{Störung}$ und der des ausgewerteten Signals V_{Signal} .

7.4. Reflexionen und Positionsvariation

Eine weitere bedeutende Schwierigkeit bei akustischen Messungen stellen Reflexionen dar. Diese entstehen aufgrund des Medienübergangs von Wasser in Kunststoff, sowie Kunststoff in Luft am Beckenrand und von Wasser in Luft an der Wasseroberfläche, wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben. In Abb. 7.11 ist eine Messung der aufsummierten, normierten Intervallleistung der Tonpilz 2er-Konfiguration zu sehen. Die Position der APU und des Hydrofons wurde während der Messung nicht verändert. Die Messung wurde mit 128 Mittelungen bei einer Frequenzauflösung von 500 Hz durchgeführt. Im Bereich von 20-40 kHz fällt die Intervallleistung mehrfach stark ab. Es ist unwahrscheinlich, dass dies der Charakteristik des sendenden Schallwandlers geschuldet ist, da diese in den Messungen bei direkter Ankopplung des Sensors (vgl. Kapitel 6) keine solche Einbrüche zeigte. Auch der zusätzliche Medienübergang in Wasser kann nicht die Ursache dafür sein, da der Effekt nur bei einzelnen Datenpunkten auftritt. Es liegt daher nahe, dass sie durch destruktive Interferenz verursacht sind, welche aufgrund von Reflektionen am Beckenrand oder der Wasseroberfläche entstehen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass auch konstruktive Interferenz auftritt und den Verlauf der Intervallleistung fälschlicherweise anheben kann.

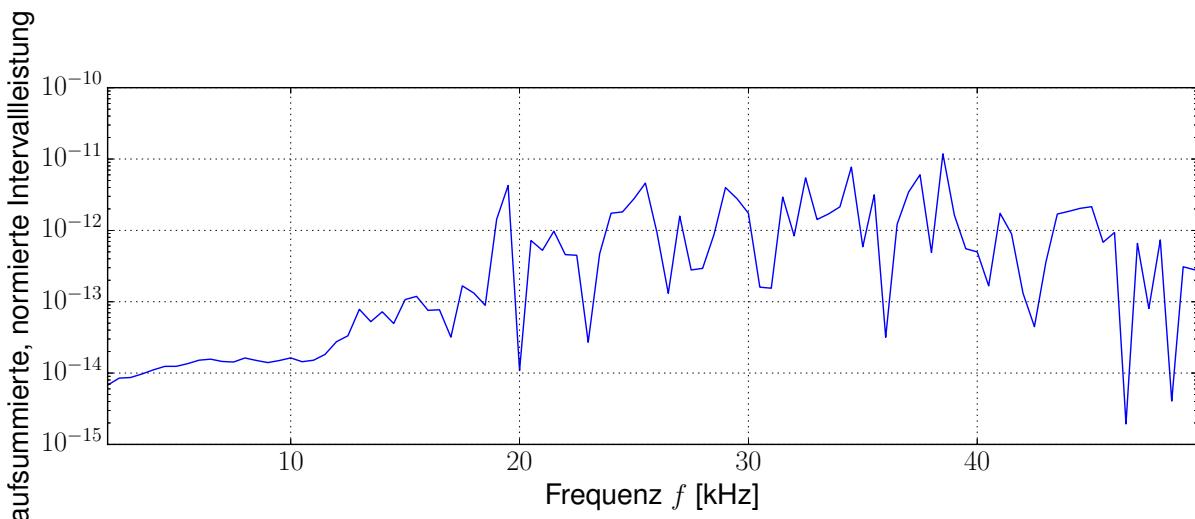


Abbildung 7.11.: Der Verlauf zeigt eine Messung der aufsummierten, normierten Intervallleistung, welche auf einer festen Position von APU und Hydrofon im Becken mit 128 Mittelungen und einer Frequenzauflösung von 500 Hz aufgenommen wurde. Es ist deutlich zu sehen, dass bei mehreren Datenpunkten, beispielsweise bei 20, 23, 36, 42.5, 47 und 49 kHz, die Intervallleistung stark einbricht.

Im Rahmen dieser Messungen gibt es zwei potenziell störende Effekte, welche aufgrund eines reflektierenden Beckenrandes auftreten. Einerseits kann die Geometrie des Behältnisses zu einer Charakteristik in den Intervallleistungsspektren führen, was dadurch kommt, dass sich bei bestimmten Frequenzen stehende Wellen zwischen Beckenbegrenzungen bilden. Das geschieht bei Wellenlängen oder Vielfachen dieser, die die gleiche Länge aufweisen, wie charakteristische Abstände innerhalb des Behältnisses. In diesem Fall würde das eine Anhebung der Intervallleistung im Bereich von 0.9-1 kHz und Vielfachen dieser Frequenz durch eine Boden-Decken-Resonanz und von ca. 1.5 kHz und Vielfachen davon durch die Resonanz zwischen den seitlichen Becken-

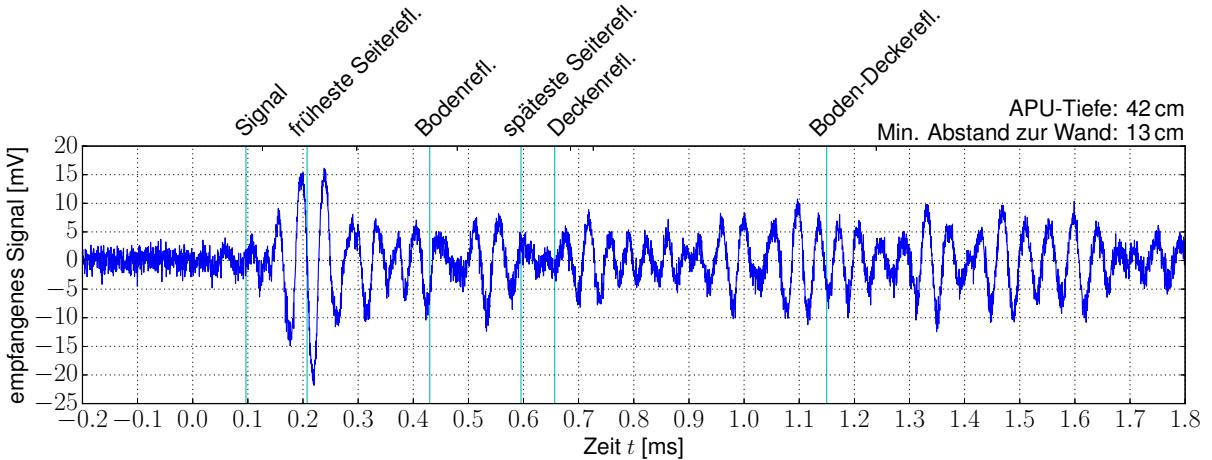


Abbildung 7.12.: Ein Sinus-Burst-Signal mit nur drei Oszillationen wurde am Funktionsgenerator eingestellt und am Oszilloskop das vom Hydrofon aufgezeichnete Signal betrachtet. Mit einfachen Laufzeitberechnungen wurde aus den Abständen von APU, Hydrofon und Beckenberandung und der Schallgeschwindigkeit in Wasser die Zeit berechnet, nach der das direkte Signal und die Reflexionen (früheste, späteste Seitenreflexion, Boden-, Decken- und Bodendecken-Reflexion) eingetroffen sind. Das Diagramm zeigt allerdings, dass das Zuordnen auch dieser einfachen Reflexionen schwierig und ein nachträgliches Herausrechnen zu komplex ist.

wänden verursachen. Die Charakteristik bei diesem Effekt ändert sich nicht, wenn der Sender an anderer Stelle im Wasserbehälter montiert wird. Da sich bei weiteren Messungen eine starke Abhängigkeit der störenden Effekte im Signal von der Position von APU und Hydrofon herausstellt, kann diese nicht mit der Resonanzcharakteristik des Behälters zusammenhängen, da sich an der Geometrie des Wasserbehälters bei verschiedenen Frequenzen nichts ändert. Dadurch wird dieser Effekt bei den hier durchgeführten Messungen vernachlässigt.

Der andere störende Effekt, welcher sich durch einen reflektierenden Beckenrand ergibt, ist, dass sich das direkte Signal des Schallwandlers aus der APU am Ort des Hydrofons stets mit Reflexionen desselben Signals überlagert. Dadurch, dass diese die gleiche Frequenz besitzen, kann es sowohl zu sehr starker konstruktiver als auch destruktiver Interferenz kommen. Dabei hängt die Art der Interferenz sowohl von der Frequenz des ausgesendeten Signals als auch von der Position ab, an der gemessen wird. Dies hängt damit zusammen, dass der Gangunterschied, mit dem sich die beiden Signale überlagern, sowohl von der Wellenlänge dieser als auch vom Abstand zur Beckenberandung abhängt. Die Abschwächung der Amplitude als Kugelwelle bei den Reflexionen reicht nicht aus, um den Effekt dieser zu vernachlässigen, da die von einem reflektierten Signal zurückgelegte Strecke in dem hier verwendeten Wasserbehältnis unterhalb eines Meters liegt.

Ein Versuch, mit einfachen Berechnungen die Hauptquellen der Reflexionen und deren Wirkung zu untersuchen, ist in Abb. 7.12 dargestellt. Dabei begrenzen die früheste und späteste Seitenreflexion den Bereich, in dem bei einer Messposition abseits der Mitte des zylinderförmigen Behälters Seitenwandreflexionen zu erwarten sind. Trotz Laufzeitberechnungen für die Zeiten, an denen die ersten Reflexionen von Boden, Decke oder Wänden eintreffen sollten, ist es nicht möglich klare Zuordnungen vorzunehmen und die Reflexionen nachträglich herauszurechnen. Für einen sinnvollen Vergleich der Schallwandler-Typen ist es zwingend notwendig den Effekt der Interferenzen zu mindern. Im Verlauf der Arbeit wurden daher verschiedene Lösungsansätze

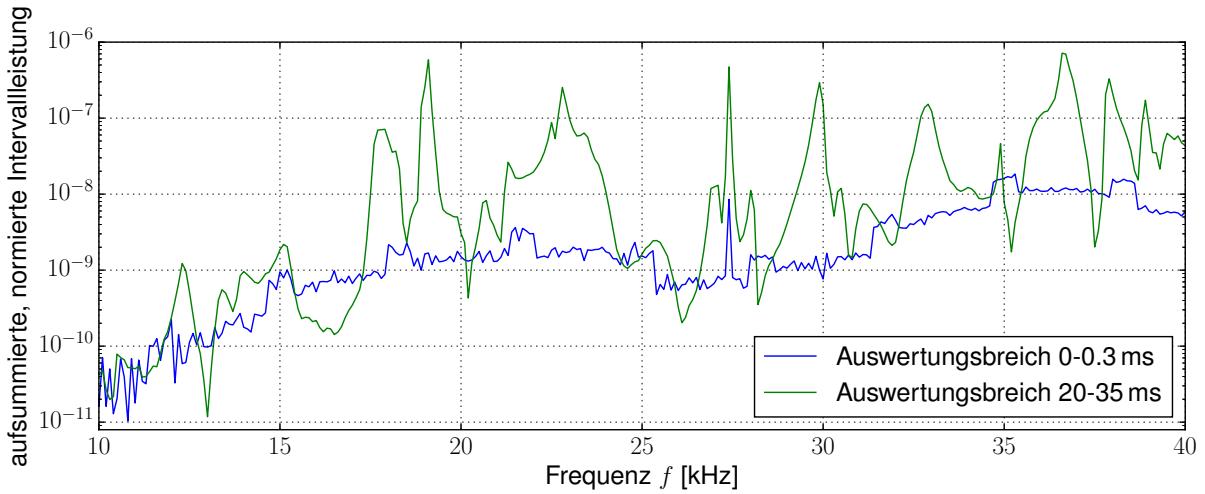


Abbildung 7.13.: Gezeigt sind zwei Intervalleistungsspektren, welche aus den gleichen Messdaten bei einer Messung mit direkter Ankopplung des Sensors (Kapitel 6) generiert wurden. Es wird ein Auswertungsfenster in einem kleinen Bereich von 0.3 ms mit dem sonst verwendeten langen Auswertungsfenster von 15 ms verglichen.

untersucht, mit dem Ziel die Reflexionen während der Messwertaufnahme zu verhindern oder abzuschwächen. Diese sind im Folgenden erläutert.

Um Reflexionen gänzlich zu vermeiden, liegt es nahe den Versuchsaufbau in ein größeres Wasserbecken zu verlegen. Das Verhindern von Reflexionen ist dabei nur im Rahmen von Messungen innerhalb von Freiwasser, beispielsweise in einem nahe gelegenen See, möglich. Die Durchführung solcher Messungen übersteigt allerdings den Rahmen dieser Arbeit, da ausführliche Vorbereitungen für die Organisation und den Aufbau der Messgeräte getroffen werden müssten. Auch Messungen in einem Aachener Schwimmbad, welches bereits bei anderen Messungen im Rahmen von EnEx-RANGE genutzt wurde, bieten keine Verbesserung der Messsituation, da diese zeitlich auf vier Stunden beschränkt sind und ein Aufbau der Messumgebung samt anschließender Messungen mit Wechsel der Schallwandler in dieser Zeitspanne nicht möglich ist.

Ein anderer Ansatz ist die Auswertungsmethode so anzupassen, dass nur der Bereich des Signals verwendet wird, der reflexionsfrei ist. Dies ist das Zeitfenster, in dem das direkte Signal der APU bereits am Hydrofon eintrifft, allerdings noch keine Reflexionen dieses überlagern. Kritisch ist dieses Auswertungsfenster, weil es einerseits äußerst kurz und andererseits in der Einschwingphase des Schallwandlers platziert ist. Zur Untersuchung, ob unter diesen Bedingungen sinnvolle Messergebnisse erhalten werden können, wird auf Basis von Daten der Messungen mit direkter Ankopplung der Messsensorik ein Vergleich zwischen kurzem Auswertungsfenster im Einschwingbereich und dem gewöhnlichen Auswertungsfenster im Bereich von 20-35 ms gezogen. Die Daten dieser Messungen bieten dabei den Vorteil, dass sie frei von den Störungen des Aufbaus in Wasser sind. Für das kurze Auswertungsfenster wird ein Wert von 0.3 ms ausgewählt, da der minimal erreichbare Abstand des Hydrofons zur Beckenbegrenzung bei 25 cm liegt. Die Messung ist in Abb. 7.13 abgebildet. Der Vergleich der Kurven zeigt, dass die Auswertung im kleinen Auswertungsfenster nur einen sehr groben Verlauf der Sendecharakteristik abbildet. Eine Evaluierung von Schallwandlern erscheint basierend darauf nicht sinnvoll. Eine deutliche Vergrößerung des Wasserbeckens könnte zwar eine etwas längere Messzeit ermöglichen, welche aber weiterhin im Einschwingbereich und damit in einem Bereich stattfinden muss, in dem die Amplituden noch

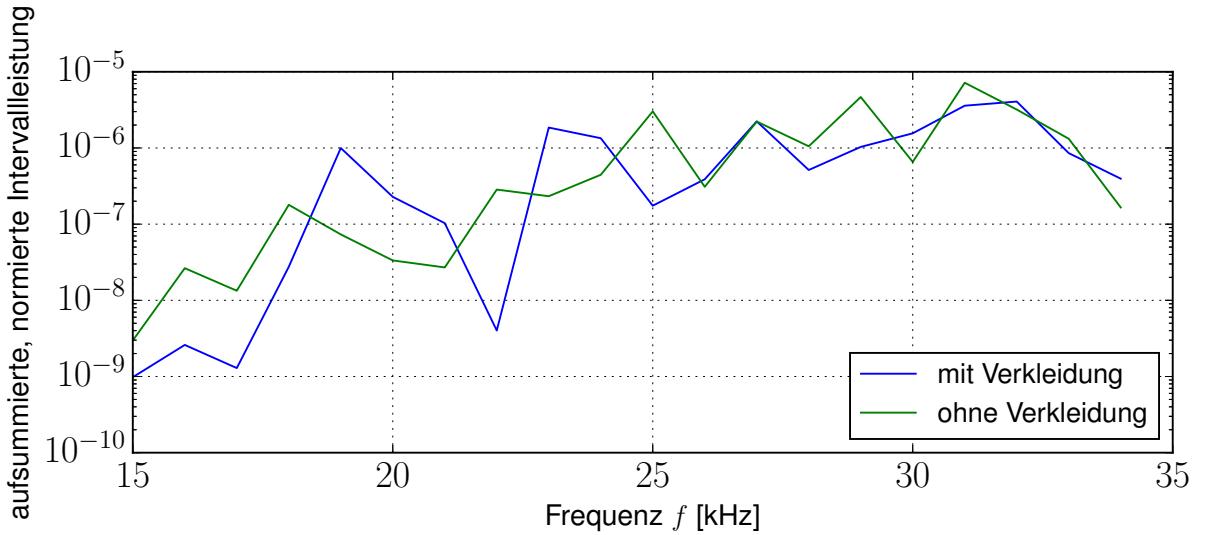


Abbildung 7.14.: Abgebildet sind die Intervallleistungsspektren einer Messung mit Noppen-schaumauskleidung im Wasserbehälter und einer ohne Auskleidung. Der Verlauf beider Kurven lässt nicht auf klare Vorteile des Noppenschaums schließen, da keine allgemein abschwächende Wirkung des Noppenschaums erkennbar ist, welche allerdings zu erwarten wäre, wenn dieser Reflexionen an den Beckenrändern mindert.

merklich im Vergleich zum eingeschwungenen Zustand des Systems schwanken. Ein anderer Ansatz ist, die Reflexionen am Beckenrand zu vermindern, indem absorbierendes Material daran angebracht wird. In einer vorangegangenen Bachelorarbeit von Cornelius Vollbrecht [Vol16] wurde Noppenschaum erfolgreich als Dämmmaterial bei akustischen Messungen in Wasser im Frequenzbereich von 100-800 kHz verwendet. Dies motiviert eine Vergleichsmessung, ob ein Einsatz von Noppenschaum auch im Rahmen der hier durchgeführten Messungen sinnvoll ist. In Abb. 7.14 werden dazu zwei Intervallleistungsspektren des Tonpilz-Schallwandlers in 2er-Konfiguration verglichen, wobei die blaue Kurve mit Auskleidung der Beckenwände und des -bodens durch Noppenschaum aufgenommen wurde und die grüne Kurve ohne die Auskleidung durch Noppenschaum. Die Position der APU und des Hydrofons wurde nicht verändert. Die Messung wurde in 1 kHz-Schritten mit 128 Mittelungen durchgeführt. Beide Kurven unterscheiden sich deutlich. In der Messung unter Einsatz des Noppenschaums ist ein Peak der Intervallleistung bei 19 kHz und ein deutlicher Einbruch bei 22 kHz zu erkennen. Der ohne Noppenschaum aufgezeichnete Kurvenverlauf enthält diese starken Schwankungen nicht. Sollte der Noppenschaum für eine Abschwächung der Reflexionen sorgen, sollte auch der Wert für die Intervallleistung allgemein etwas absinken. Dies ist allerdings nicht erkennbar. Der Vergleichsplot zeigt damit keine klaren Vorteile einer Auskleidung des Wasserbehälters mit Noppenschaum. Da diese Maßnahme zudem sehr viel Aufwand verursacht, da der Noppenschaum das Wasser schneller verunreinigt und dieses in Folge dessen häufiger ausgetauscht werden muss, wird der Noppenschaum als Ansatz zur Minderung von Reflexionen verworfen.

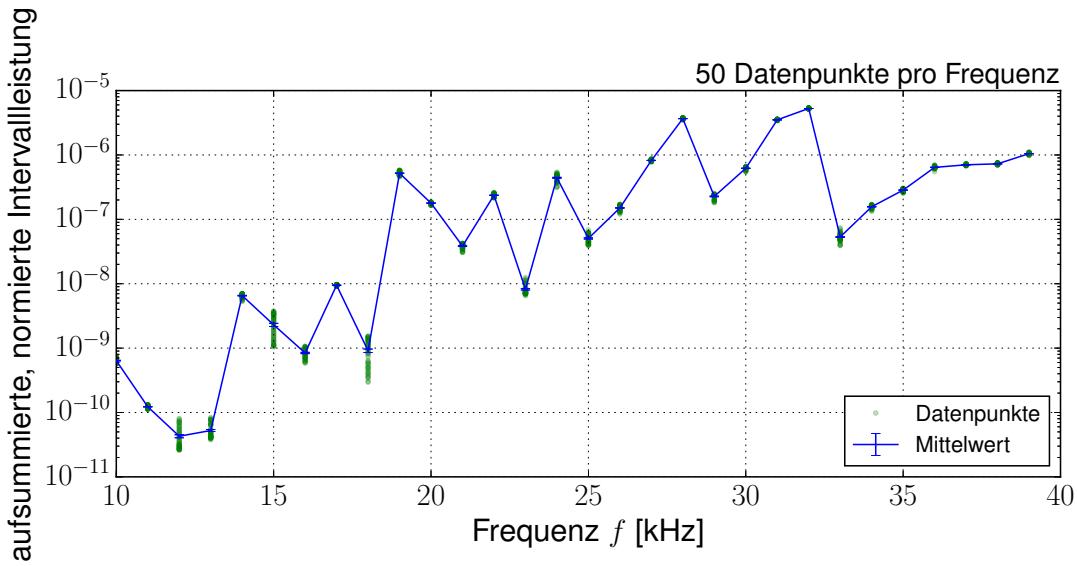


Abbildung 7.15.: Der Plot zeigt eine Messung der aufsummierten, normierten Intervallleistung der Tonpilz 2er-Konfiguration in Abhängigkeit von der Frequenz der angelegten Spannung. Die Messung wurde insgesamt fünfzig mal mit den gleichen Einstellungen vorgenommen. Aus allen Messwerten wurden Mittelwert und dessen Standardabweichung gebildet. Die Schwankungen der Messwerte fallen sehr gering aus, was die These bestätigt, dass bei jeder Messung der gleiche, stationäre Zustand der Überlagerung von Direktsignal mit Reflexionen vorliegt.

7.4.1. Methode der Positionsvariation

Zahlreiche Ansätze die für die Interferenzeffekte ursächlichen Reflexionen zu vermeiden oder zu vermindern stellen sich als erfolglos heraus. Wie bereits oben beschrieben treten Interferenzeffekte abhängig von der Messposition unterschiedlich stark auf. An den einzelnen Positionen ist der Effekt allerdings stationär (vgl. Abb. 7.15), was den Ansatz motiviert, an möglichst vielen unterschiedlichen Positionen im Wasserbecken das Intervallleistungsspektrum auszuwerten und über diese Werte zu mitteln. Die Idee ist, dass durch die Mittelung ein Wert für die Intervallleistung gefunden wird, der sehr wenig durch konstruktive oder destruktive Interferenz verfälscht ist. Der Ablauf wird im folgenden Abschnitt erläutert.

Mit dem vorhandenen Versuchsaufbau ist es möglich den Wasserbehälter in der horizontalen Ebene zu verschieben. Zudem erlaubt die Trägerkonstruktion aus den Aluminium-Profilen eine Variation der Höhe von APU und Hydrofon ohne den Abstand zwischen diesen Komponenten zu ändern. Damit kann die Messposition im Becken mit geringem Aufwand von Hand variiert werden. Es wird dabei darauf geachtet, dass die Position im Becken möglichst gleichmäßig verteilt geändert wird und keine Positionen doppelt vermessen werden. Die Aufnahme eines Intervallleistungsspektrums dauert rund eine Stunde, wobei 128 Mittelungen und eine Frequenzauflösung von bis zu 200 Hz gewählt werden. Damit eine vollständige Messung innerhalb eines Tages durchgeführt werden kann, wird die Anzahl von Messpositionen pro Schallwandler-Charakterisierung in den meisten Messungen auf ungefähr zehn Positionen begrenzt. Da die Messwerte auf einzelnen Positionen mitunter stark variieren, liegt es nahe den Median als Mittelungsverfahren dem arithmetischen Mittelwert vorzuziehen. In Abb. 7.16 ist als Beispiel für das Verfahren der Positionsvariation eine Messung der Tonpilz 2er-Konfiguration dargestellt.

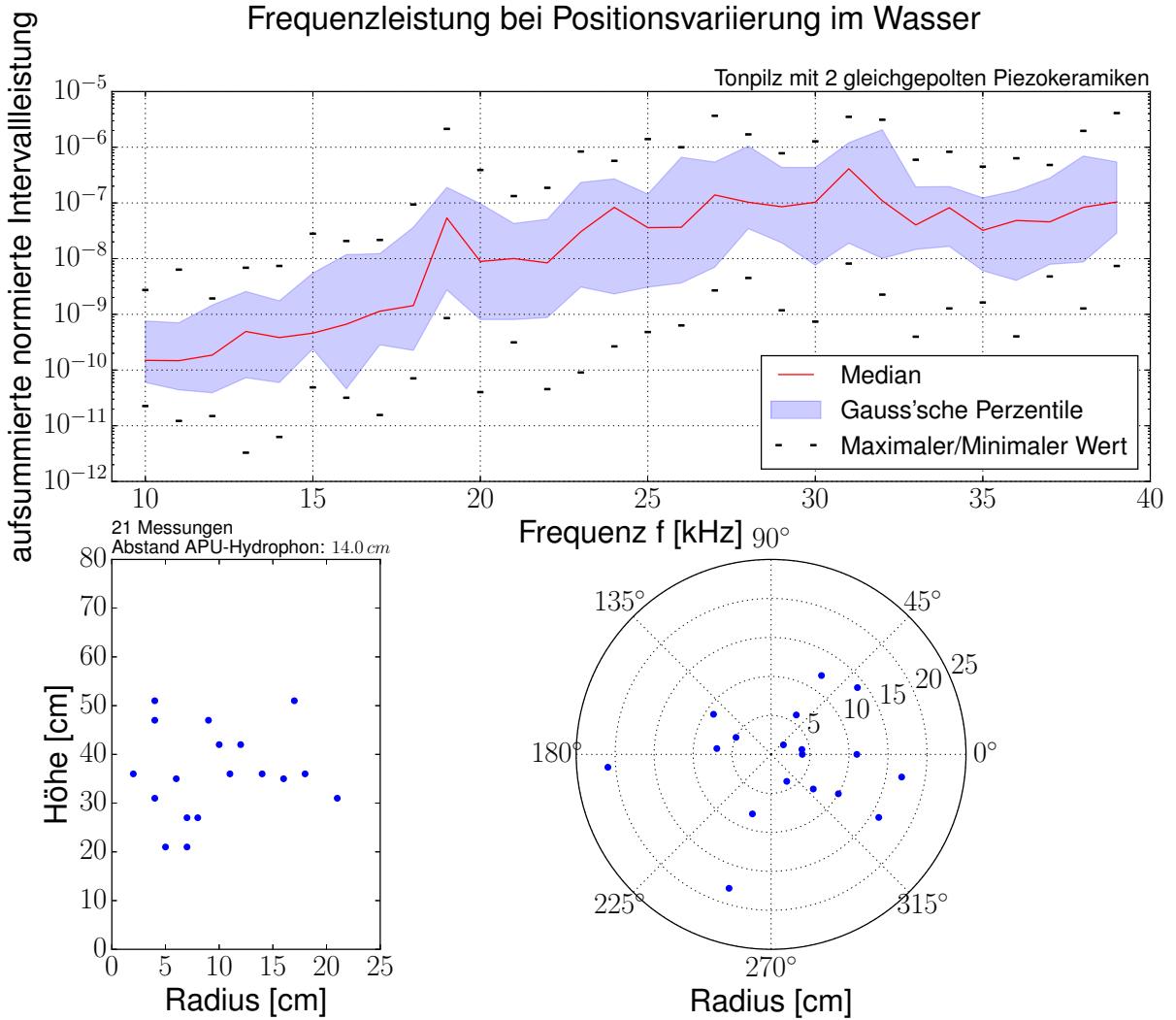


Abbildung 7.16.: Beispiel einer Messung mit Positionvariation für die 2er-Konfiguration des Tonpilz-Schallwandlers. Es wurde in diesem Fall auf 21 verschiedenen Positionen gemessen. In der oberen Grafik ist die aufsummierte, integrierte Intervalleistung in rot abgebildet, welche durch Medianbildung über die Messwerte bei verschiedenen Positionen bei jeder Frequenz gebildet wurde. Der Graph ist blau unterlegt in dem Bereich, in dem die Gauß'schen Perzentile liegen. Dies ist der Bereich, in dem 68.3 % der Einzelmesswerte liegen. Mit schwarzen Balken oberhalb und unterhalb ist der minimale und maximale Messwert abgebildet. Die beiden Grafiken darunter dienen als Übersicht über die einbezogenen Messpositionen. Links ist die Höhe der Messposition und der Abstand der Messposition zum Mittelpunkt des Zylinderquerschnitts als Radius abgebildet. Die Messposition ist dabei durch die Position des Hydrofons ausgezeichnet, die Position der APU liegt bei allen Messungen 14 cm über dem Hydrofon. Unten rechts sind die Messpositionen im Querschnitt des Zylinderbeckens eingezeichnet.

7.5. Reproduzierbarkeit und Messungenauigkeit

Das Verfahren der Positionsvariation beruht auf Mittelung über Medianbildung über mehrere Messpositionen im Wasserbehälter. Damit soll ein Messwert für die aufsummierte, normierte Intervallleistung gefunden werden, welcher möglichst wenig durch Interferenz verzerrt ist. Die Dauer der Messungen beschränkt die Anzahl von Messpositionen, welche zur Basis der statistischen Auswertung mit dem Median herbeigezogen werden. Da diese Anzahl in der Größenordnung von zehn Positionen liegt, ist es wichtig für den Vergleich zwischen zwei Schallwandlern die Messgenauigkeit dieses Verfahrens abzuschätzen. Zur Einordnung der Schwankungen der Einzelmesswerte bei jeder Position werden in den Plots gauß'sche Perzentile eingezeichnet, also Bereiche in denen 68.3 % der auf den verschiedenen Positionen aufgezeichneten Messwerte liegen. Zudem sind der bei jeder Frequenz minimal und maximal gemessene Wert für die Intervallleistung durch Balken oberhalb und unterhalb des Kurvenverlaufs gekennzeichnet. Dies bildet eine gute Informationsgrundlage, um die Schwankung bei jeder Frequenz individuell zu beurteilen. Zur Überprüfung der Schwankungen, die im Rahmen der Positionsvariation mit rund zehn verschiedenen Messpositionen möglich sind, wird ein Vergleich zweier Messungen des Tonpilz-Schallwandlers in 2er-Konfiguration in Abb. 7.17 vorgenommen. Der jeweils gleiche Schallwandler-Aufbau wird dazu an einem Tag auf elf verschiedenen Positionen mit dem Verfahren ausgewertet und am darauf folgenden Tag unter unveränderten Bedingungen auf zehn verschiedenen Positionen. Der Kurvenverlauf der zweiten Messreihe liegt nahezu über den ganzen Frequenzbereich oberhalb des Kurvenverlaufs der ersten Messreihe. Trotzdem liegen beide Kurvenverläufe größtenteils innerhalb des Bereichs der gauß'schen Perzentile der jeweils anderen Kurve oder nur knapp darunter: Rund 57 % der Medianwerte der blauen Kurve liegen innerhalb des gauß'schen Perzentils der roten Kurve, umgekehrt sind es rund 73 %. Im Rahmen der geringen Stichprobe von zehn Messpositionen bestätigt dies die gauß'schen Perzentile als Orientierung für die Messgenauigkeit.

In Abb. 7.18 werden zwei weitere Messungen gegenübergestellt. Die in rot dargestellte Messreihe basiert auf den Daten beider Messungen des Intervallleistungsspektrum der Tonpilz 2er-Konfiguration, welche in Abb. 7.17 bereits vorgestellt wurden. Damit werden zwanzig Positionen zur Medianbildung berücksichtigt. Die in blau dargestellte Messreihe zeigt auch das Intervallleistungsspektrum der Tonpilz 2er-Konfiguration, jedoch wurde die Gewindestange aus verzinktem Kohlenstoff durch eine Gewindestange aus Edelstahl ausgetauscht und der Schallwandler-Aufbau dazu komplett neu aufgebaut. Zudem wurde diese Messreihe in 200 Hz-Schritten auf zehn Messpositionen durchgeführt. Die Intervallleistung des Schallwandlers mit Gewindestange aus Kohlenstoffstahl liegt nahezu über den vollen Frequenzbereich unterhalb der Kurve, die mit dem Aufbau mit Edelstahl-Gewindestange aufgenommen wurde. Die Kurven liegen jedoch größtenteils im Bereich des gauß'schen Perzentils der jeweils anderen Messreihe und unterscheiden sich damit im Rahmen der Genauigkeit der Methode nicht bedeutend. Damit kann der Einfluss der anderen Gewindestange im Rahmen des Vergleichs von Schallwandlern mit dieser Methode vernachlässigt werden. Dieser Plot bestätigt auch die Reproduzierbarkeit einzelner Schallwandler.

Insgesamt bietet das Verfahren der Positionsvariation mit der in diesen Messungen erreichten Anzahl an Messpositionen einen annehmbaren Rahmen, um Schallwandler-Aufbauten zu vergleichen. Dabei ist allerdings das um den Kurvenverlauf gelegte Band der gauß'schen Perzentile besonders zu beachten, Messwerte können in diesem Bereich statistisch als auch systematisch in eine Richtung schwanken.

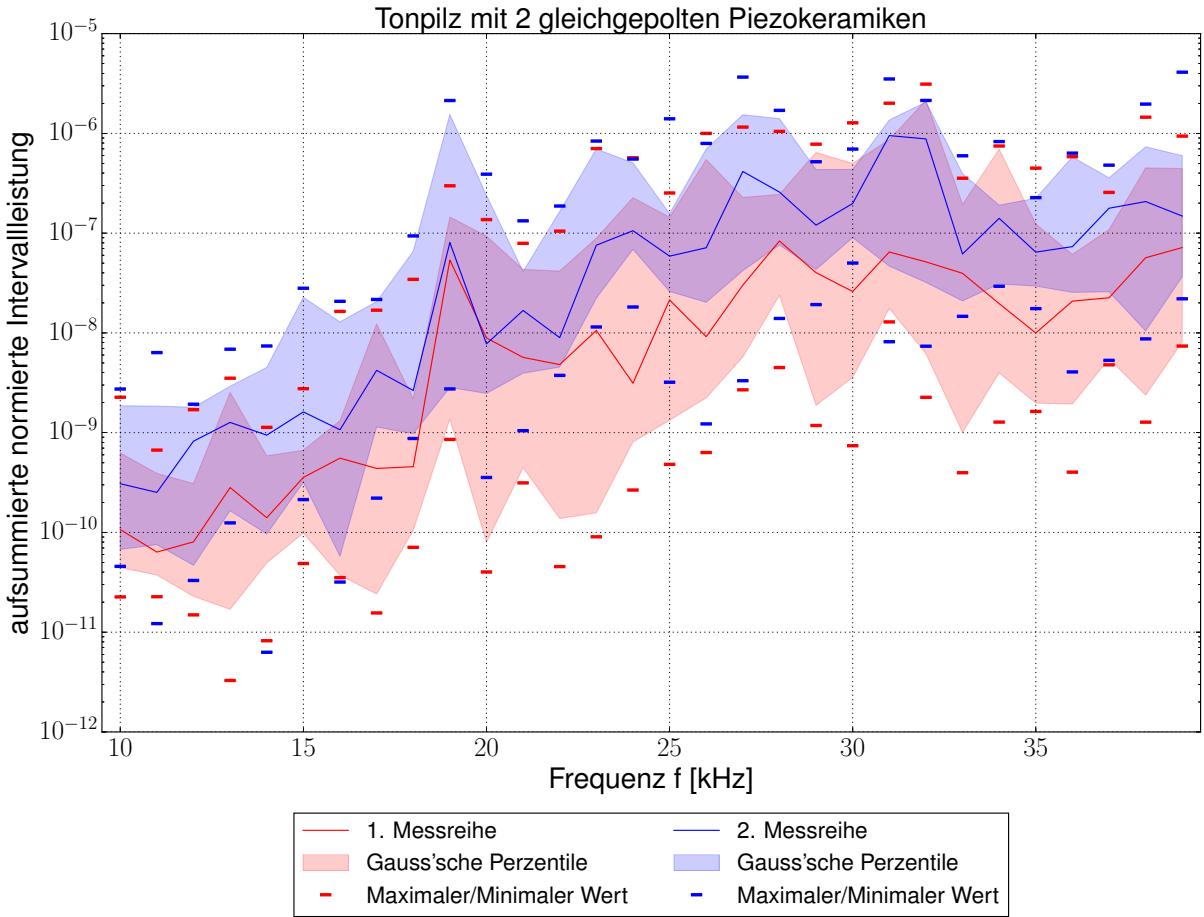


Abbildung 7.17.: Das Intervallleistungsspektrum des Tonpilz-Schallwandlers in 2er-Konfiguration wurde zweimal unabhängig voneinander mit dem Verfahren der Positionsvariation mit 128 Mittelungen und 1 kHz-Schritten gemessen. Dazu wurde der gleiche Aufbau bei beiden Messungen verwendet. Die erste Messreihe erfolgte mit einem Median über elf ausgemessene Positionen, die zweite Messreihe mit 10 ausgemessenen Positionen. Zur Einschätzung der Schwankung der Messwerte der einzelnen Positionen, sind gauß'sche Perzentile eingezeichnet, welche den Bereich kennzeichnen, in welchem 68.3 % der Einzelmesswerte liegen. Dieser ist in der gleichen Farbe wie der zugehörige Graph für jeden der beiden Graphen unterlegt. Balken oberhalb und unterhalb dieses Bereiches kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Einzelmesswert. Allgemein liegen die Messwerte der ersten Messreihe in rot bei allen Frequenzen außer 20 kHz unterhalb von denen der zweiten Messreihe in blau. Insgesamt liegen 22 von 30 Messwerten der blauen Kurve innerhalb der gauß'schen Perzentile der roten Kurve und 17 von 30 Messwerten der roten Kurve innerhalb der gauß'schen Perzentile der in blau dargestellten Messreihe.

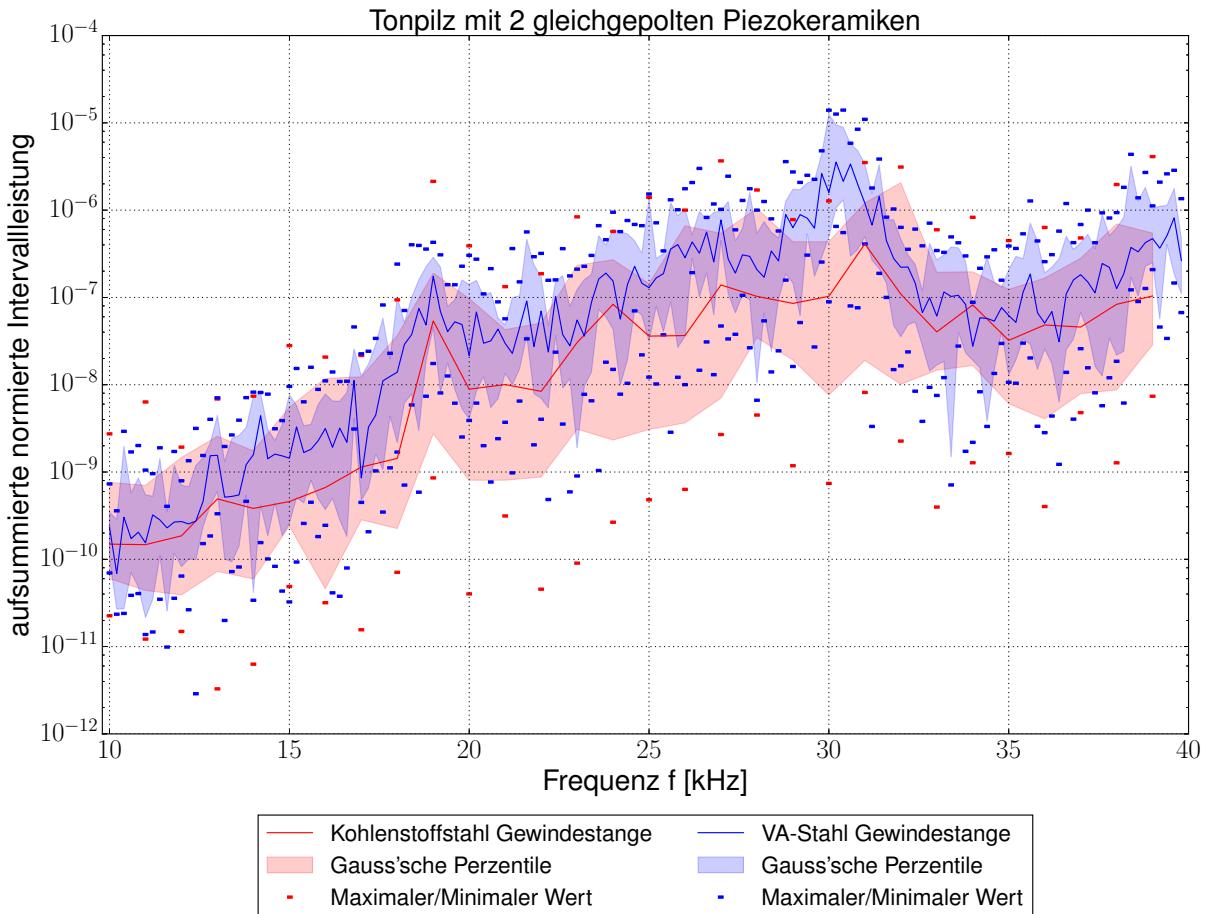


Abbildung 7.18.: In rot ist das Intervallleistungsspektrum des Tonpilz-Schallwandlers in 2er-Konfiguration mit verzinkter Kohlenstoffstahl-Gewindestange dargestellt. Es wurde auf Basis von 21 Messpositionen gemessen, welches die Messpositionen aus den beiden in Abb. 7.17 vorgestellten Messungen sind. In blau ist das Intervallleistungsspektrum des nahezu gleichen Aufbaus gezeigt. Die ursprüngliche Gewindestange aus verzinktem Kohlenstoffstahl wurde durch eine Gewindestange aus Edelstahl ersetzt. Zudem ist die Messung der blauen Kurve auf Basis von zehn Messpositionen in 200 Hz-Schritten erstellt. Die blaue Kurve liegt insgesamt etwas höher als die rote, jedoch liegen die Werte der blauen Kurve bis auf wenige Ausnahmen innerhalb des rot unterlegten Bereichs und damit innerhalb der gauß'schen Perzentile der roten Kurve. Die rote Kurve liegt am unteren Rand der gauß'schen Perzentile und unterschreitet diese auch in wenigen Fällen.

8. Ergebnisse der Messungen in Wasser

In diesem Kapitel wird die Methode der Positionsvariation, die im vorhergehenden Kapitel 7 diskutiert wird, benutzt, um die Resonanzspektren der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Schallwandlerdesigns zu untersuchen. Dabei wird einerseits in Abschnitt 8.1 die Tonpilz 2er- mit der 4er-Konfiguration verglichen. Andererseits wird in Abschnitt 8.2 untersucht, wie sich das Hammerdesign vom Tonpilzdesign mit jeweils vier eingesetzten Piezokeramikscheiben unterscheidet. Einzelne Plots der Messungen mit Details zu den vermessenen Positionen befinden sich im Anhang A.5.

8.1. Vergleich verschiedener Tonpilz-Konfigurationen

In Abb. 8.1 ist das Ergebnis der Messung in Wasser für beide Tonpilz-Konfigurationen dargestellt.

Im Bereich von ca. 10-25 kHz weisen beide Kurven die gleichen Tendenzen im Verlauf auf: Sie steigen zunächst an, erreichen ein Maximum, sinken dann etwas ab und steigen danach noch über das Maximum hinaus an. Das passt zur Erwartung, dass sich bei gleichem Design mit Änderung der Anzahl der Piezokeramikscheiben der Verlauf der Kurve zwar verschieben, aber nicht qualitativ ändern sollte. Die Intervallleistung des Tonpilz-Aufbaus in 4er-Konfiguration liegt stets über der des Aufbaus mit nur zwei Piezokeramiken. Dies lässt darauf schließen, dass durch eine Erhöhung der Anzahl der Piezokeramiken eine Erhöhung der Sendeleistung im Frequenzbereich von 10-25 kHz erreicht werden kann. Dabei ist die Intervallleistung der Konfiguration mit vier Piezokeramiken um bis zu drei Größenordnungen größer, wie beispielsweise bei ca. 18 kHz. Für kleine Frequenzen sinken beide Kurven auf sehr kleine Werte ab, die circa fünf Größenordnungen unterhalb der Maxima liegen. Bei diesen Frequenzen wird wesentlich weniger Leistung in das Wasser eingekoppelt, als bei den betrachteten höheren Frequenzen.

Im oberen Bereich der Frequenzen von 25-40 kHz zeigen sich dagegen zwei qualitativ verschiedene, inverse Verläufe der Intervallleistungen. So erreicht die Intervallleistung der 4er-Konfiguration bei ca. 26, 34 und 39 kHz ähnlich hohe Maxima und besitzt danach eine sinkende Tendenz ab ca. 39 kHz. Der Verlauf bei der 2er-Konfiguration hat dagegen ein globales Maximum bei ca. 31 kHz, wo ein Minimum der 4er Konfiguration liegt. Die Lage dieses Maximums passt zur theoretisch zu erwartenden Resonanzfrequenz des Schmelzkopfes aufgrund seiner Geometrie bei 30.9 kHz, wenn er genau bei der Wellenlänge seiner doppelten Höhe von $H = 8 \text{ cm}$ angeregt wird:

$$f_{Kopf} = \frac{v_L}{2H} \approx 30.9 \text{ kHz} \quad (8.1)$$

Dieser Peak sollte theoretisch jedoch auch bei der 4er-Konfiguration auftreten, was allerdings nicht der Fall ist.

Mit den theoretischen Vorhersagen aus Gleichung (3.13) zum vereinfachten mechanischen Modell des Schallwandlers ergibt sich eine Resonanz bei ca. 90 kHz für die 2er-Konfiguration und bei ca. 64 kHz für die 4er-Konfiguration. Diese Werte liegen jedoch außerhalb des Messbereichs, sodass sich keiner der Peaks einer theoretisch erwarteten Resonanz zuordnen lässt.

Insgesamt zeigt die Messung, dass sich für den Einsatz bei Frequenzen unterhalb von 28 kHz und zwischen 31-38 kHz die Tonpilz 4er-Konfiguration besser eignet, da sie höhere Intervallleistungen einkoppelt. Bei Frequenzen im Bereich von 28-31 kHz verlaufen beide Kurven ungefähr auf gleichem Niveau, hierbei lässt sich keine Konfiguration bezüglich des Sendevermögens favorisieren.

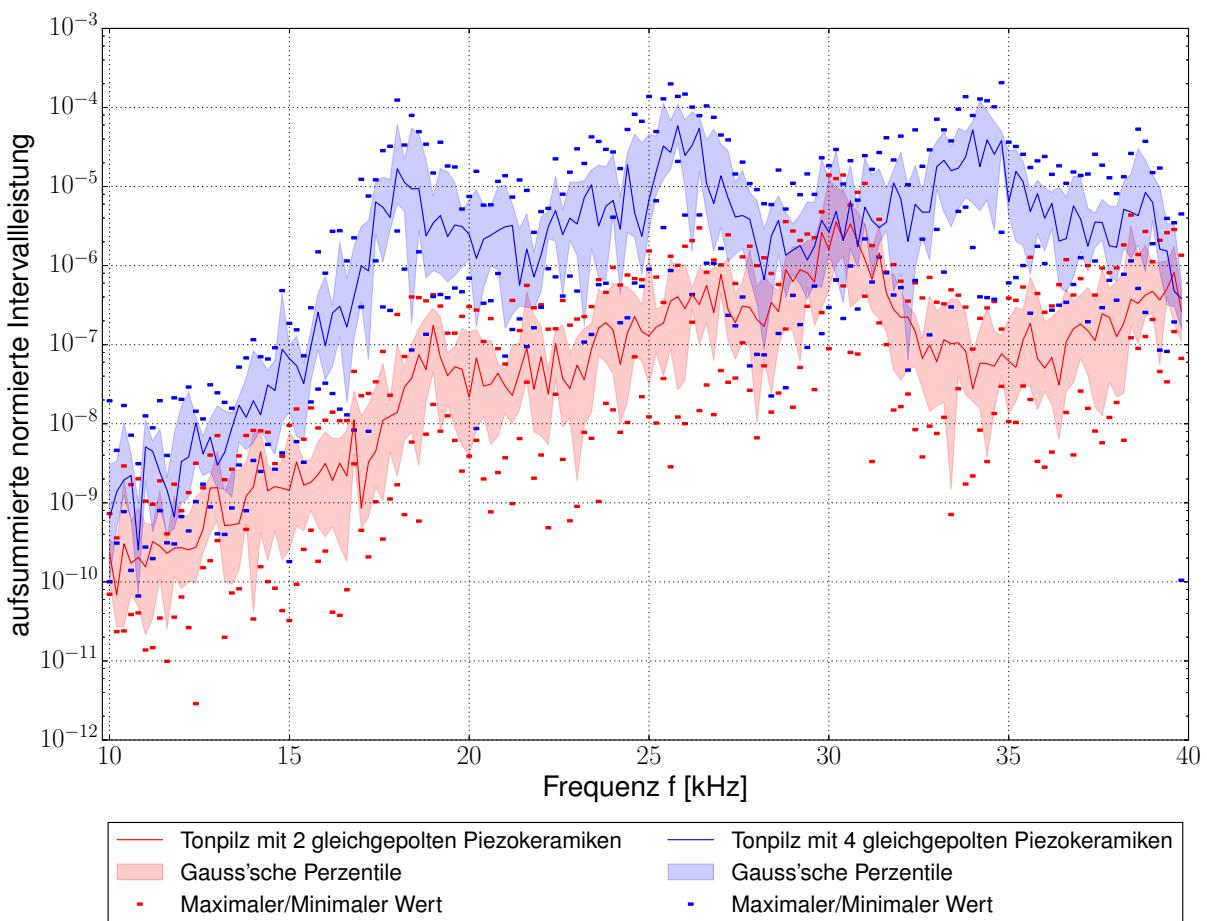


Abbildung 8.1.: Vergleich der Messungen zur 2er- und 4er-Konfiguration des Tonpilzschallwandlers: Der blaue Graph gehört zum Tonpilz-Schallwandler in 4er-Konfiguration, also mit vier gleichgepolten Piezokeramikscheiben, während der rote Graph vom Tonpilz-Schallwandler in 2er-Konfiguration stammt. Beide Schallwandler-Aufbauten sind in Abschnitt 4.2 erklärt. Es wird die aufsummierte, normierte Intervallleistung wie in Kapitel 5 beschrieben aufgezeichnet und gegen die Sende-frequenz aufgetragen. Es zeigen sich die gleichen Tendenzen im Verlauf der beiden Konfigurationen im Bereich von 10-25 kHz, danach unterscheiden sich die Verläufe der beiden Graphen deutlich. Insgesamt liegt die Kurve der 4er-Konfiguration über den ganzen Frequenzbereich oberhalb der Werte der 2er-Konfiguration. Dabei unterscheiden sich die Kurven bei 18 kHz und 34 kHz um bis zu drei Größenordnungen. Für kleine Frequenzen sinken beide Kurven auf sehr kleine Werte ab, die circa fünf Größenordnungen unterhalb der Maxima liegen.

8.2. Vergleich zwischen Hammer- und Tonpilz-Schallwandler

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zum Tonpilz- und Hammerdesign mit jeweils vier Piezokeramikscheiben gegenübergestellt. Die Aufbauten sind in Abschnitt 4.2 erklärt. Abb. 8.2 zeigt die jeweils gemessenen Intervallleistungsspektren. Die Messwerte zur Tonpilz 4er-Konfiguration sind identisch zu Abschnitt 8.1.

Die Verläufe der beiden Schallwandlerdesigns sind grundsätzlich verschieden. Auf den Verlauf der Intervallleistung beim Tonpilzdesign wurde bereits in Abschnitt 8.1 näher eingegangen. Die Intervallleistung des Hammerdesigns besitzt im Bereich der vorderen 5 kHz ein nur schwach ansteigendes, aber um bis zu zwei Größenordnungen höheres Signal als die des Tonpilzdesigns. Damit ist er besonders in diesem Frequenzbereich ein besserer Sender als das Tonpilzdesign. Bei höheren Frequenzen gibt es beim Hammerdesign zwei deutliche Maxima bei ca. 22 und 32 kHz und ein um eine Größenordnung geringeres Maximum bei 25 kHz.

Ein Vergleich der beiden ersten Maxima zeigt, dass diese die gleiche Höhe haben, das Maximum beim Tonpilzdesign aber schon bei ca. 18 kHz liegt. Da bei einer möglichst geringen Sendefrequenz gearbeitet werden soll, erscheint der Tonpilz zunächst als besser geeignet, da er zusätzlich auch noch kompakter ist.

Eine Betrachtung der mittels eines vereinfachten mechanischen Modells theoretisch erwarteten Resonanzfrequenzen in Gleichung (3.13) und Gleichung (3.14) zeigt jedoch, dass das Hammerdesign wesentlich besser mit den Erwartungen übereinstimmt. So liegt der theoretische Wert bei ca. 24 kHz. Das stimmt im Rahmen der Messgenauigkeit dieser Messung und in Anbetracht der Tatsache, dass es sich nur um ein recht einfaches Modell handelt, überein. Für das Tonpilzdesign liegt der theoretisch erwartete Wert dagegen bei 64 kHz und damit außerhalb des Messbereichs. Damit bietet das Hammerdesign die Möglichkeit durch geeignete Variation der Parameter die Resonanzfrequenz systematisch zu kleineren Frequenzen hin zu verschieben. Es ließe sich durch eine größere Schwungmasse oder dickere Piezokeramikscheiben mit kleinerer Auflagefläche die Resonanzfrequenz des Aufbaus systematisch verringern. Dies ist beim Tonpilzdesign aufgrund der fehlenden Übereinstimmung mit der Theorie nicht systematisch möglich.

Insgesamt lässt sich für kleinere Frequenzen im Bereich von 10-16 kHz das Hammerdesign aufgrund der deutlich höheren Intervallleistung favorisieren. Im Bereich darüber bietet das Tonpilzdesign Vorteile. Es erreicht bereits bei rund 18 kHz eine Intervallleistung, die das Hammerdesign erst bei ungefähr 22 kHz hat und ist zudem wegen der fehlenden Schwungmasse wesentlich kompakter und leichter. Hervorzuheben ist, dass das Hammerdesign besser zum bisher angenommenen mechanischen Modell zu passen scheint und damit systematische Änderungen des Aufbaus zur Senkung der Resonanzfrequenz vielversprechend sind.

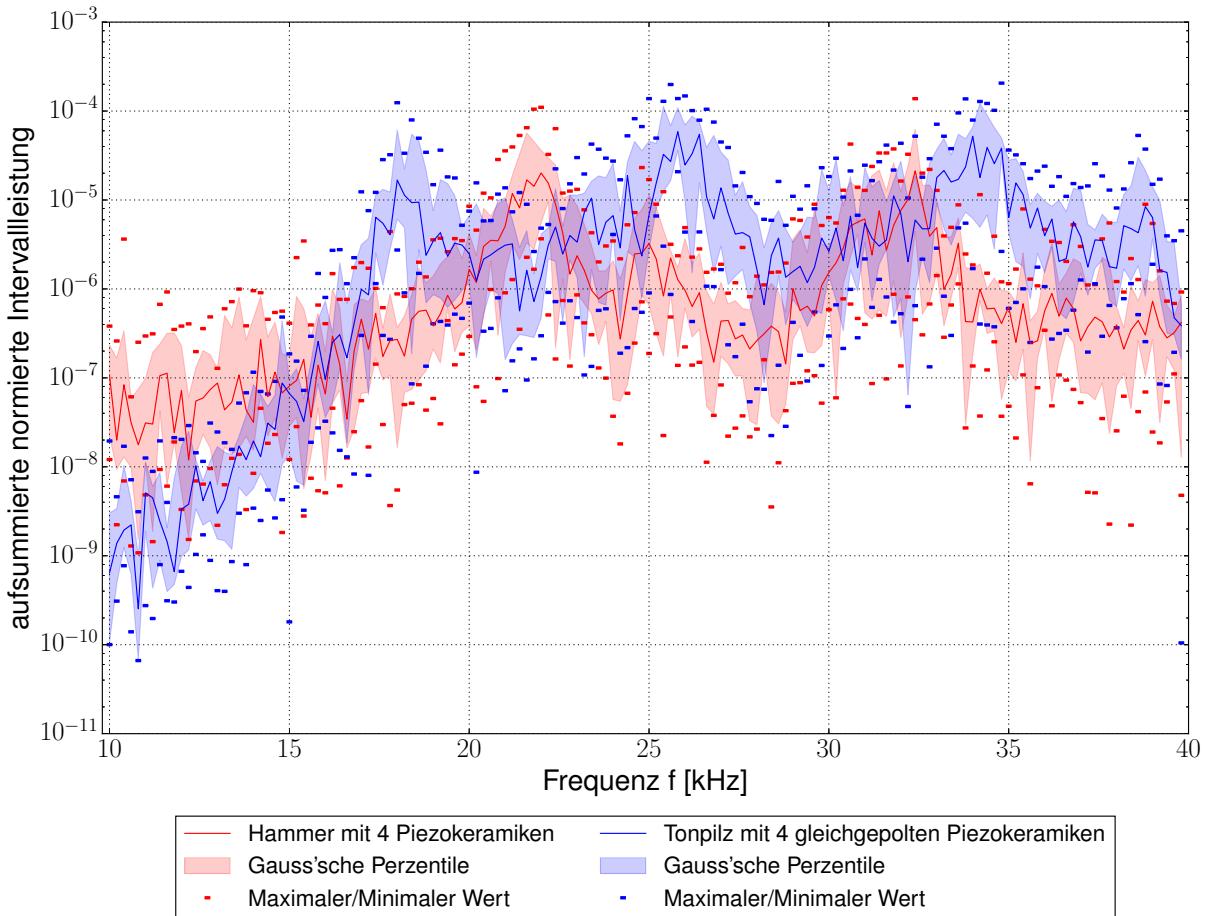


Abbildung 8.2.: Vergleich zwischen Hammer- und Tonpilz-Schallwandler: Der blaue Graph gehört zum Tonpilzdesign und der Rote zum Hammerdesign. Es wird die aufsummierte, normierte Intervallleistung wie in Kapitel 5 beschrieben aufgezeichnet und gegen die Sendefrequenz aufgetragen. Die Verläufe sind grundsätzlich verschieden: Die Intervallleistung des Hammerdesigns liegt im unteren Frequenzbereich von 10-16 kHz um bis zu 2 Größenordnungen höher als beim Tonpilzdesign. Letzteres steigt im kleinen Frequenzbereich stärker an und erreicht früher, bereits bei 18 kHz, ein Maximum, welches der Hammer-Schallwandler mit vergleichbarer Intervallleistung erst bei 22 kHz hat.

9. Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer robusten Methodik zum Vergleich verschiedener akustischer Schallwandler. Die Herausforderung bestand dabei vor allem darin, ein geeignetes Verfahren zur Aufnahme von aussagekräftigen Messdaten zur akustischen Einkopplung der verschiedenen Emittoren in Wasser zu entwerfen. Dies ist in dieser Arbeit gelungen, sodass ein Vergleich zweier Schallwandlerdesigns durchgeführt werden konnte.

Zunächst wurden im Rahmen dieser Arbeit alle drei geplanten Schallwandlerkonfigurationen, die Tonpilz 2er- und 4er- sowie die Hammer 4er-Konfiguration, erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Auch die Messapparatur zur Generierung der nötigen Sendesignale und gleichzeitigen Datenaufnahme der vom Schallwandler empfangenen Signale ließ sich ohne Probleme installieren.

Zur Auswertung der gemessenen Daten wurde eine robuste Methodik entwickelt, in der mit der Welch-Methode die spektrale Leistungsdichte adäquat berechnet und somit ein robuster Schätzer für die Leistung bei der Sendefrequenz im Signal generiert werden kann.

Diese Methode und die Messapparatur zur Signalgenerierung und Datenaufnahme wurden durch Messungen bei direkter Einkopplung des Schallwandlers in einen akustischen Sensor verifiziert. Untersuchungen der Sensitivität des Messaufbaus auf schallwandlerunabhängige Parameter zeigten allerdings eine starke Abhängigkeit von der Positionierung des Schallwandlers auf dem kleinen Sensor und der Unterlage, auf der die Messung durchgeführt wird. Eine Messreihe zur systematischen Untersuchung des Drehmoments, mit dem die Mutter zur Fixierung der Komponenten im Schallwandler angezogen wird, legt zudem eine deutliche Abhängigkeit der eingekoppelten Leistung von diesem Parameter nahe. Der dahintersteckende systematische Zusammenhang ließ sich jedoch nicht identifizieren. Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Messungen bei direkter Einkopplung, dass diese Methode aufgrund der starken Abhängigkeit von den schallwandlerunabhängigen Parametern eher ungeeignet für den Vergleich verschiedener Schallwandlerarten ist. Deshalb wurde ein Messaufbau konstruiert, der die Vermessung der frequenzabhängigen Sendeleistung eines in die APU integrierten Schallwandlers in einem Wasserbehälter ermöglicht. Hierbei wurde ein Störsignal als kapazitive Kopplung zwischen Sender und Empfänger identifiziert und durch systematisches Schirmen sowie Erden der Komponenten für große Bereiche auf ein vernachlässigbares Level reduziert. Außerdem treten durch die kompakte, räumliche Begrenzung bei Messungen in einem Wasserbehälter störende Reflexionen auf. Mit der Positionsvariation wurde eine Vorgehensweise entwickelt, um damit umzugehen und trotz Reflexionen reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Alternativen wie die Absorption des Schalls am Behälterrands mittels Noppenschaum, wie es sich in der Raumakustik bewährt hat, oder eine Auswertung im Einschwingbereich konnten durch Messungen ausgeschlossen werden. Auch die Schwankungen, die im Sendesignal auftreten, wurden untersucht und korrigiert. Mit den gauß'schen Perzentilen ließ sich außerdem eine sinnvolle Abschätzung für die Schwankungen der Messwerte der in das Wasser eingekoppelten Leistung bei der Methode der Positionsvariation angeben.

Dabei ließe sich Messgenauigkeit durch eine Automatisierung der Variation der Positionen mit mehr Messpunkten noch weiter verbessern. Alternativ wäre es auch denkbar die Methode mittels geeigneter Simulationen zu überprüfen. Insgesamt bietet die bisher entwickelte Methode jedoch eine ausreichende Grundlage, um weitere Schallwandlerdesigns zu untersuchen. Auf Basis dieser

Untersuchungen ließe sich dann eine begründete Entscheidung für die Wahl des Schallwandlers in zukünftigen Versionen der APU treffen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit diesem Messverfahren drei Schallwandlerkonfigurationen untersucht. Ein Vergleich zwischen dem Tonpilzdesign mit zwei und vier Piezokeramikscheiben zeigt, dass sich über weite Teile des betrachteten Frequenzbereichs durch die Erhöhung der Anzahl der Piezokeramikscheiben auch die eingekoppelte Leistung erhöhen lässt. Damit bietet die Tonpilz 4er-Konfiguration bei nur geringfügiger Erhöhung von Masse und Ausmaßen eine deutliche Verbesserung zur 2er-Konfiguration. Insgesamt stellen sich jedoch beide Konfigurationen eher als ungeeignet für den Gebrauch bei unter 15 kHz heraus, da für kleine Frequenzen die eingekoppelte Leistung um bis zu fünf Größenordnungen unter den Maximalwerten liegt.

Der Vergleich von Tonpilz- und Hammer-Schallwandler mit vier Piezokeramikscheiben zeigt, dass letzterer für Frequenzen im Bereich von 10-15 kHz mehr Leistung einkoppelt. Andererseits liegt der erste markante Peak des Tonpilzdesigns bei 18 kHz und damit vor dem ersten vergleichbaren Peak des Hammerdesigns bei 22 kHz. Schön ist jedoch, dass die theoretisch mittels eines einfachen mechanischen Modells für den Hammer-Schallwandler berechnete Resonanzfrequenz mit den Messwerten vereinbar ist. Das ist beim Tonpilzdesign nicht der Fall, da sie dort außerhalb des Messbereichs liegen. Das deutet auf die Möglichkeit, die Resonanzfrequenz durch systematische Veränderung der Parameter des Aufbaus zu kleineren Frequenzen zu verschieben. Das könnte einen Vorteil des Hammerdesigns darstellen. Im Gegenzug zeichnet sich das Tonpilzdesign durch seine Kompaktheit aus.

Neben diesen Schallwandlern wäre es auch interessant, einen viel benutzten und gut verstandenen Schallwandler mit der entwickelten Methodik zu vermessen. Ein Vergleich der Ergebnisse mit dem Datenblatt und den hier betrachteten Designs böte eine sinnvolle Referenz und würde zusätzlich die Methode weiter verifizieren.

Da der Fokus beim EnEx-RANGE-Projekt langfristig auf einem Navigationssystem in Gletschereis liegt, wären Messungen mit direkter Einkopplung ans Eis ein weiterer sinnvoller Schritt. Dabei würde die hier entwickelte Methode prinzipiell funktionieren, jedoch ist die Verschiebung von Schallwandler und akustischem Sensor, besonders bei konstantem Abstand, in einem Eisblock deutlich komplizierter. Die Entwicklung einer für Eis optimierten Messmethodik könnte im Rahmen einer weiteren Bachelorarbeit erfolgen. Eine solche Messung würde zudem Auskunft über die Vergleichbarkeit von Messungen in Wasser und Eis geben. Damit ließe sich auch verifizieren, wie relevant die Messungen im Wasser für die Wahl eines Emitters im Eis sind.

Zusammenfassend ist es gelungen eine robuste Methode zum Vergleich von verschiedenen Emittoren bezüglich ihrer Auskopplung in ein Wasserbecken zu entwickeln, deren zeitlicher Aufwand sich mit der Vermessung eines Emitters pro Tag in Grenzen hält. Mit dieser Methode wurden Messungen zu verschiedenen Schallwandlerdesigns durchgeführt und der Entscheidungsprozess für die Wahl eines optimalen akustischen Emitters wurde einen Schritt weiter vorangebracht.

Literaturverzeichnis

- [Bar] Jürgen Barz. „Investigation on plunger and shot-sleeve for a better casting process“. In: Schmelzmetall Deutschland GmbH. URL: <http://www5.schmelzmetall.com/wp-content/uploads/2015/04/Simulation-Kolben-Gie%5C%C3%5C%9Fkammer.pdf> (besucht am 02.09.2016).
- [Ber16] David Maximilian Berling. „Entwicklung eines Messaufbaus zum Vergleich von akustischen Signalgebern für das EnEx-RANGE Projekt“. Bachelorarbeit. RWTH Aachen, Sep. 2016.
- [Böh11] Sarah Böhm. „Aufbau und Test eines akustischen Sensors auf PVDF-Basis für den Neutrinonachweis“. Bachelorarbeit. RWTH Aachen, Aug. 2011.
- [Dem15] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*. 7. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2015. ISBN: 978-3-662-46414-4.
- [Dem14] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik*. 6. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2014. ISBN: 978-3-642-29944-5.
- [Eli16] Dmitry Eliseev. *Zur kapazitiven Kopplung als elektromagnetische Störung*. Persönliche Mitteilung. III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, 2016.
- [Hei+16] Dirk Heinen u. a. „Akustische Navigation – Ortung und Vorfelderkundung – von Einschmelzsonden in Gletschereis“. Daga-Manuskript. III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, 2016.
- [HRS02] Gerhard Heinzel, Albrecht Rüdiger und Roland Schilling. „Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows“. Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Feb. 2002.
- [Her16] Christoph Herbert. „Zur Einkopplung von akustischen Signalen in die autonomen Pinger-Einheiten des EnEx-RANGE-Projektes“. Bachelorarbeit. RWTH Aachen, Apr. 2016.
- [Kon+15] Konstantinos Konstantinidis u. a. „A lander mission to probe subglacial water on Saturn’s moon Enceladus for life“. In: *Acta astronautica* 106 (2015), S. 63–89.
- [Kow+16] Julia Kowalski u. a. „Navigation technology for exploration of glacier ice with maneuverable melting probes“. In: *Cold Regions Science and Technology* 123 (2016), S. 53–70.
- [Len+10] Arno Lenk u. a. *Electromechanical Systems in Microtechnology and Mechatronics - Electrical, Mechanical and Acoustic Networks, their Interactions and Applications*. Berlin Heidelberg: Springer Science und Business Media, 2010. ISBN: 978-3-642-10806-8.
- [LSW09] Reinhard Lerch, Gerhard M. Sessler und Dietrich Wolf. *Technische Akustik - Grundlagen und Anwendungen*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2009. ISBN: 978-3-540-49833-9.

- [Lin16] Peter Linder. *Aufbau der Autonomen Pingereinheit*. Persönliche Mitteilung. III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, 2016.
- [Por+06] CC Porco u. a. „Cassini observes the active south pole of Enceladus“. In: *science* 311.5766 (2006), S. 1393–1401.
- [PTM] Miodrag Prokic, Jon Tapson und Bruce J.P. Mortimer. *THE ULTRASONIC HAMMER TRANSDUCER*. URL: <http://www.mpi-ultrasonics.com/content/ultrasonic-hammer-transducer> (besucht am 02.09.2016).
- [Sch16] Franziska Scholz. *Zur Abschwächung von Schall in Eis*. Persönliche Mitteilung. III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, 2016.
- [SB07] Charles H. Sherman und John L. Butler. *Transducers and Arrays for Underwater Sound* -. Berlin Heidelberg: Springer Science und Business Media, 2007. ISBN: 978-0-387-33139-3.
- [Vol16] Moritz Cornelius Vollbrecht. „Zur Dämpfung von Ultraschall in Wasser im Frequenzbereich 100-800 kHz für die Vorfelderkundung des EnEx-RANGE-Projektes“. Bachelorarbeit. RWTH Aachen, Juli 2016.
- [Wel67] Peter D Welch. „The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms“. In: *IEEE Transactions on audio and electroacoustics* 15.2 (1967), S. 70–73.
- [14] *Werkstoffdatenblatt HOVADUR® CNCS*. Schmelzmetall AG. Aug. 2014. URL: <http://www.schmelzmetall.com/wp-content/uploads/2015/06/Schmelzmetall-Hovadur-CNCS-03DE.pdf> (besucht am 02.09.2016).

A. Anhang

A.1. Werkstoffeigenschaften der Materialien und Datenblätter der Geräte

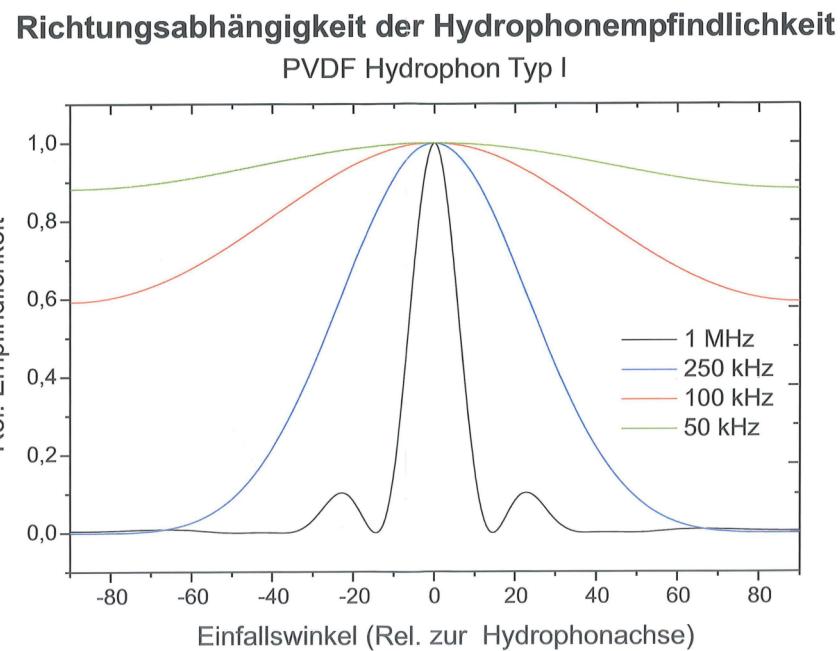
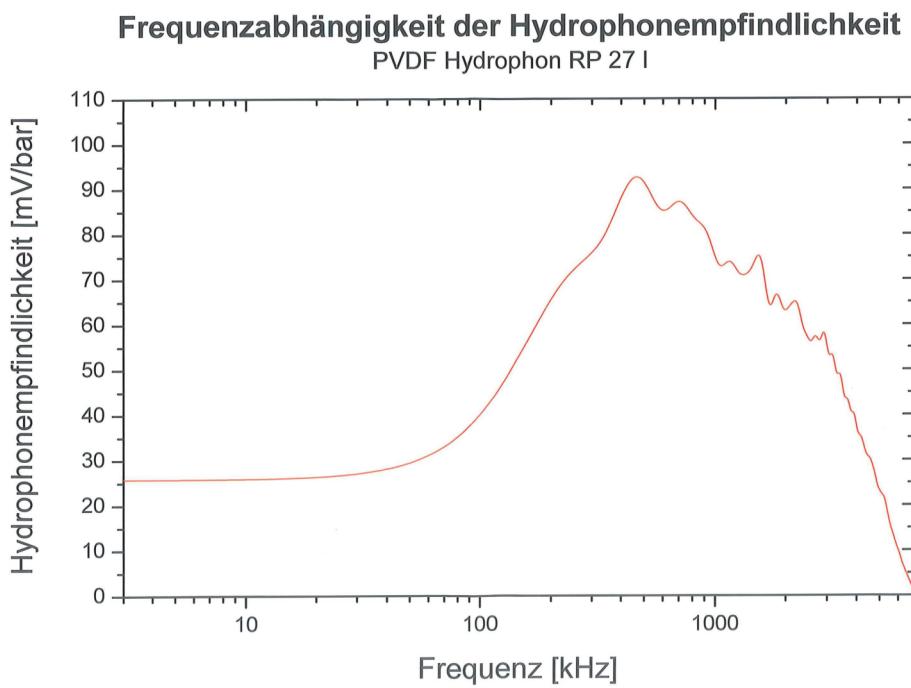
Werkstoff Material		Sonox® P4	Sonox® P8
Dielektrische Eigenschaften Dielectric properties			
Relative Dielektrizitätszahl ϵ_r			
Relative permittivity ϵ_r	ϵ_{33}/ϵ_0	1300	1000
	$\epsilon_{33}'/\epsilon_0$	660	540
	ϵ_{11}/ϵ_0	1535	1250
	$\epsilon_{11}'/\epsilon_0$	885	800
Verlustfaktor $\tan \delta$		10 ⁻³	3
Dielectric dissip. factor $\tan \delta$			2
Curietemperatur T_c Curie temperature T_c	°C	325	305
Elektromechanische Eigenschaften Electromechanical properties			
Frequenzkonstante		KHz × mm	
Frequency constant	N_p		2210
	N_s		2000
	N_i		1480
	N_z		1340
Kopplungsfaktor			0,55
Coupling coefficient	k_p		0,31
	k_{31}		0,68
	k_{33}		0,50
	k_i		0,48
	k_{15}		0,65
Ladungskonstante		10 ⁻¹² C/N	
Charge constant	d_{33}		310
	d_{31}		-130
	d_{15}		455
Spannungskonstante g_{33}		10 ⁻³ Vm/N	26,9
Voltage constant g_{33}			27,1
Mechanische Eigenschaften Mechanical properties			
Elastische Nachgiebigkeit		10 ⁻¹² m ² /N	
Elastic compliance	S_{11}^E		14,9
	S_{33}^E		18,1
Elastische Steifigkeit		10 ¹⁰ N/m ²	
Elastic stiffness	C_{33}^D		15,9
	C_{11}^D		4,8
Dichte ρ Density ρ		10 ³ kg/m ³	7,65
Gütefaktor Q_m Mechan. quality factor Q_m			7,70
			500
			1000
Stabilität Stability			
Temperaturkoeffizient α_k (Details siehe Rückseite)		10 ⁻⁴ /K ⁻¹	
Temperature coefficient α_k (Details see overleaf)			
Alterungsrate		%/Dekade	
Aging ratio	C_ϵ		-4,5
	C_f		1,0
	C_k		-1,6
			-3,0
			0,8
			-2,0

Abbildung A.1.: Werkstoffeigenschaften der Piezokeramiken

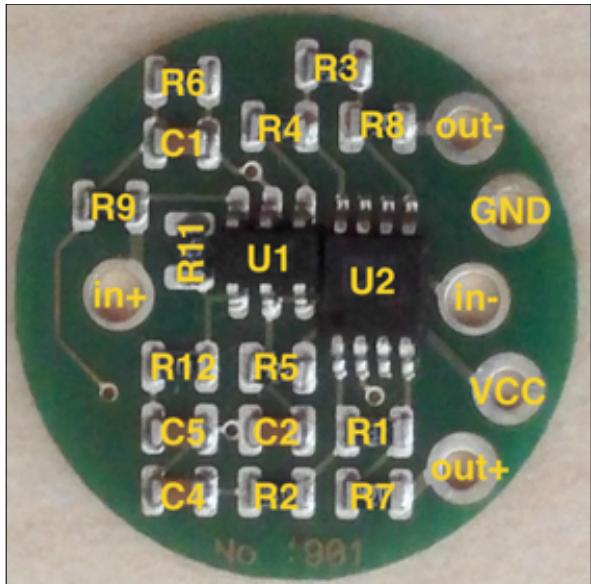
A. Anhang

C E R A M T E C				P R O T O K O L L			
P I E Z O K E R A M I K				7262			
Artikel Nr. :39999-34 Com. Nr. : Werkstoff :SP 4 Abmessungen :50*15*2 Pol. Datum :18.04.12 Gemessen am :17.06.2015 25°C Gem. von :Hristova Bemerkung :Unl Aachen DE							
Nr.	F/s kHz	F/p kHz	K/ef(Fp) %	C pF	TAN	R _o Ω	d33 pC/N
1	35.530	38.155	36.45	8529.5	.0024	4	297
2	35.460	38.155	36.92	8620.0	.0025	4	314
min-Wert:							
2	35.460	38.155	36.45	8529.5	.0024	4	297
max-Wert:							
2	35.530	38.155	36.92	8620.0	.0025	4	314
Standard-Abweichung							
2	0.052	0.031	0.33	64.0	.0001	0	12
Variation in %							
2	0.1	0.1	0.9	0.7	2.9	3.9	3.9
Mittelwerte:							
2	35.495	38.155	36.68	8574.8	.0025	4	306
Freigabedatum: 18.6.15 Unterschr: 							

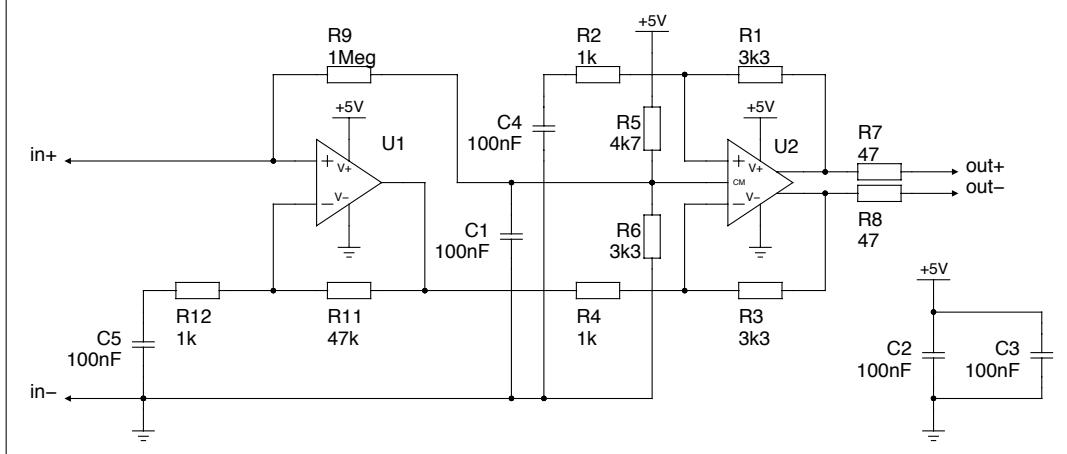
Charakteristik des Hydrofons



Eigenschaften des differenziellen Vorverstärkers



Reference	Murata	PVDF	ITC
R1,R3	3k3	10k	10k
R2,R4	1k	330	330
R5	4k7	4k7	4k7
R6	3k3	3k3	4k7
R7,R8	47	47	47
R9	1Meg	1Meg	1Meg
R11	47k	47k	47k
R12	1k	1k	1k
C1,C2,C4,C5	100nF	100nF	100nF
U1	MAX4475	MAX4475	MAX4475
U2	AD8138	AD8138	AD8138



Bandbreite: -3dB@~1.6kHz (Tiefpass R12,C5)
 -3dB@~200kHz (MAX4475 GBWP=10MHz, Gain=48)

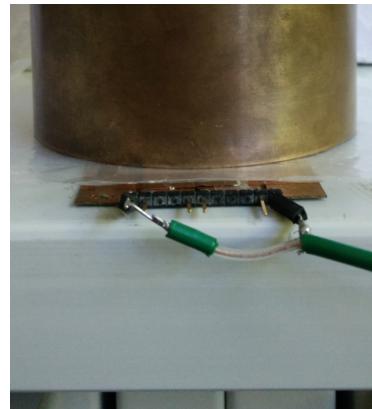
Gain: $48 \times 30 = 1440$

Anschlüsse am Twisted-Pair Kabel:

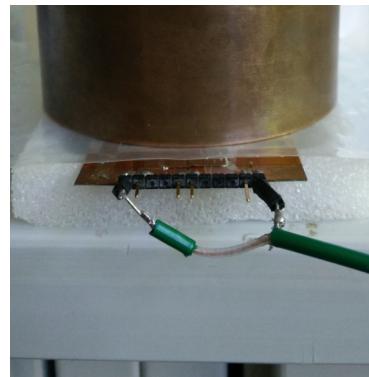
VCC (5V)	= Weiss
GND	= Braun
OUT+	= Gelb
OUT-	= Grün

A.2. Messaufbauten zur direkten Einkopplung

Variation der Unterlage bei direkter Einkopplung



(a) Direkte Auflage auf der Arbeitsplatte



(b) Schaumstoff A zwischen Arbeitsplatte und PVDF-Sensor



(c) Schaumstoff B zwischen Arbeitsplatte und PVDF-Sensor



(d) Schaumstoff B und ein weiterer APU-Kopf zwischen Arbeitsplatte und PVDF-Sensor

Größenunterschied zwischen Schmelzkopf und PVDF-Sensor

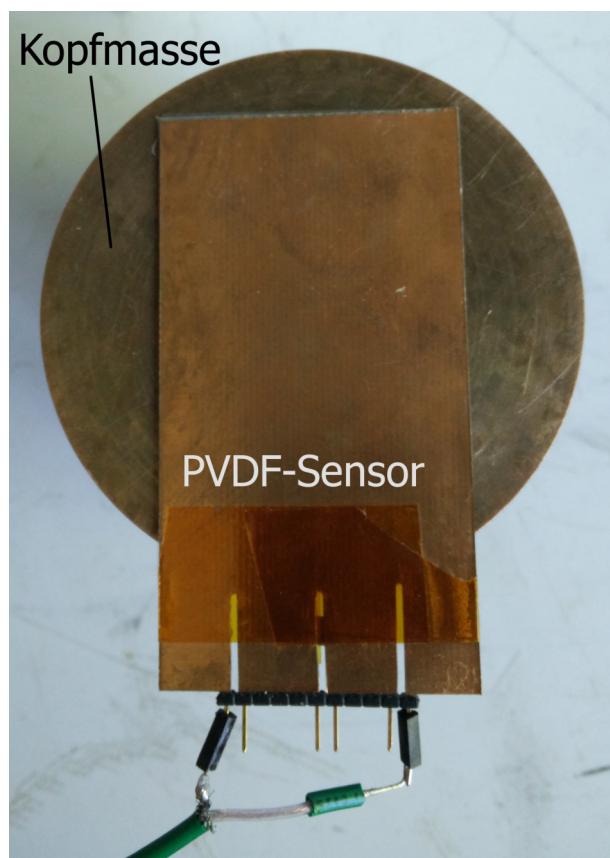


Abbildung A.3.: Platzierung des PVDF-Sensors unter dem Kopf: Der PVDF-Sensor besitzt eine wesentlich kleinere Fläche als der Schmelzkopf, sodass nur ein rechteckiger Bereich des Schmelzkopfes direkt in den Sensor einkoppelt.

A.3. Details zum Aufbau der Wassermessungen



(a) Der verwendete, zylindrische Wasserbehälter



(b) Die ca. $15\text{ cm} \times 26\text{ cm}$ große plane Abflachung am Boden in der Mantelfläche



(c) Eines der beiden mit Plastikkappen abgeklebten Löcher in der Mantelfläche



(d) Das Rollbrett mit Wasser- auffang aus Plastik, sowie einer stabilen Holzkonstruktion, auf der der Wasserbehälter auf- gebockt ist

A.4. Messaufbau zur Untersuchung der elektromagnetischen Störung

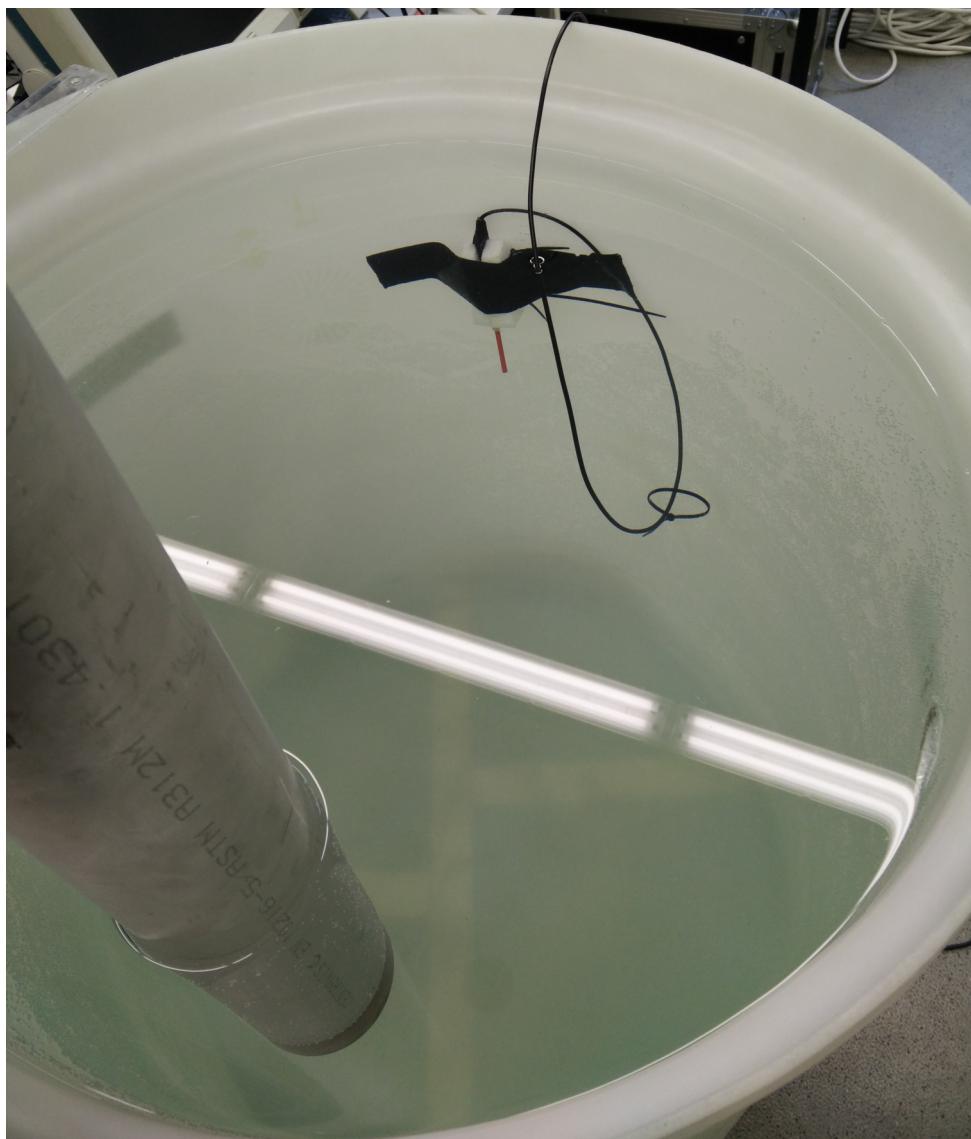


Abbildung A.5.: Anordnung von APU und Hydrofon zur Untersuchung der elektromagnetischen Störung



Abbildung A.6.: Schirmung des Steckers an der APU mittels Aluminiumfolie: Der Kontakt zum *Ground* wird hergestellt, indem mit dem Kabelbinder die Aluminiumfolie an die geerdete Hülle der APU gedrückt wird. Oben steht zur Veranschaulichung noch ein Teil der Kabel frei, auch dieser wird mit Aluminiumfolie geschirmt.

A.5. Details zu den Messungen mit der Positionsvariation

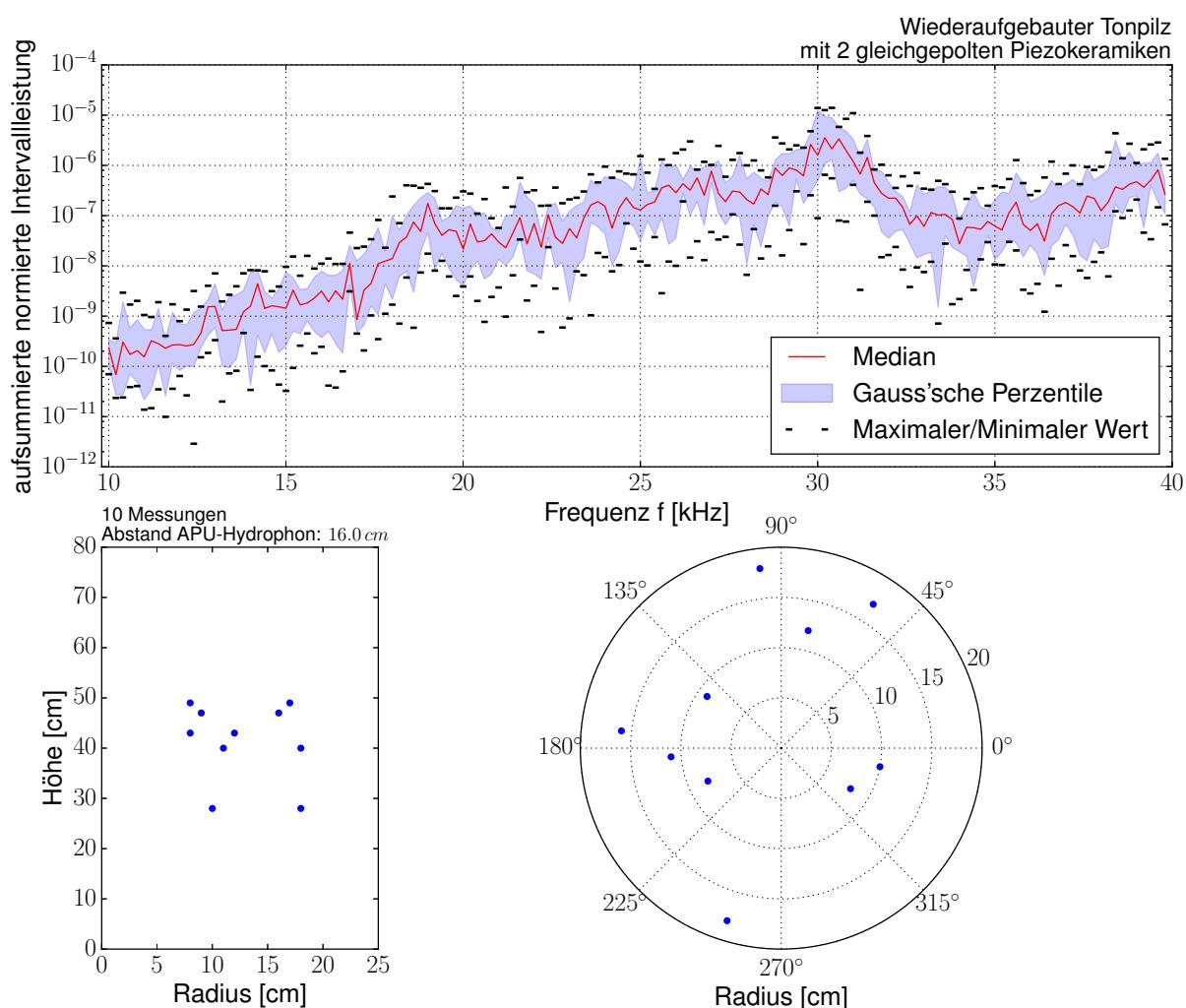


Abbildung A.7.: Details zur Messung mittels der Positionsvariation bei der Tonpilz 2er-Konfiguration

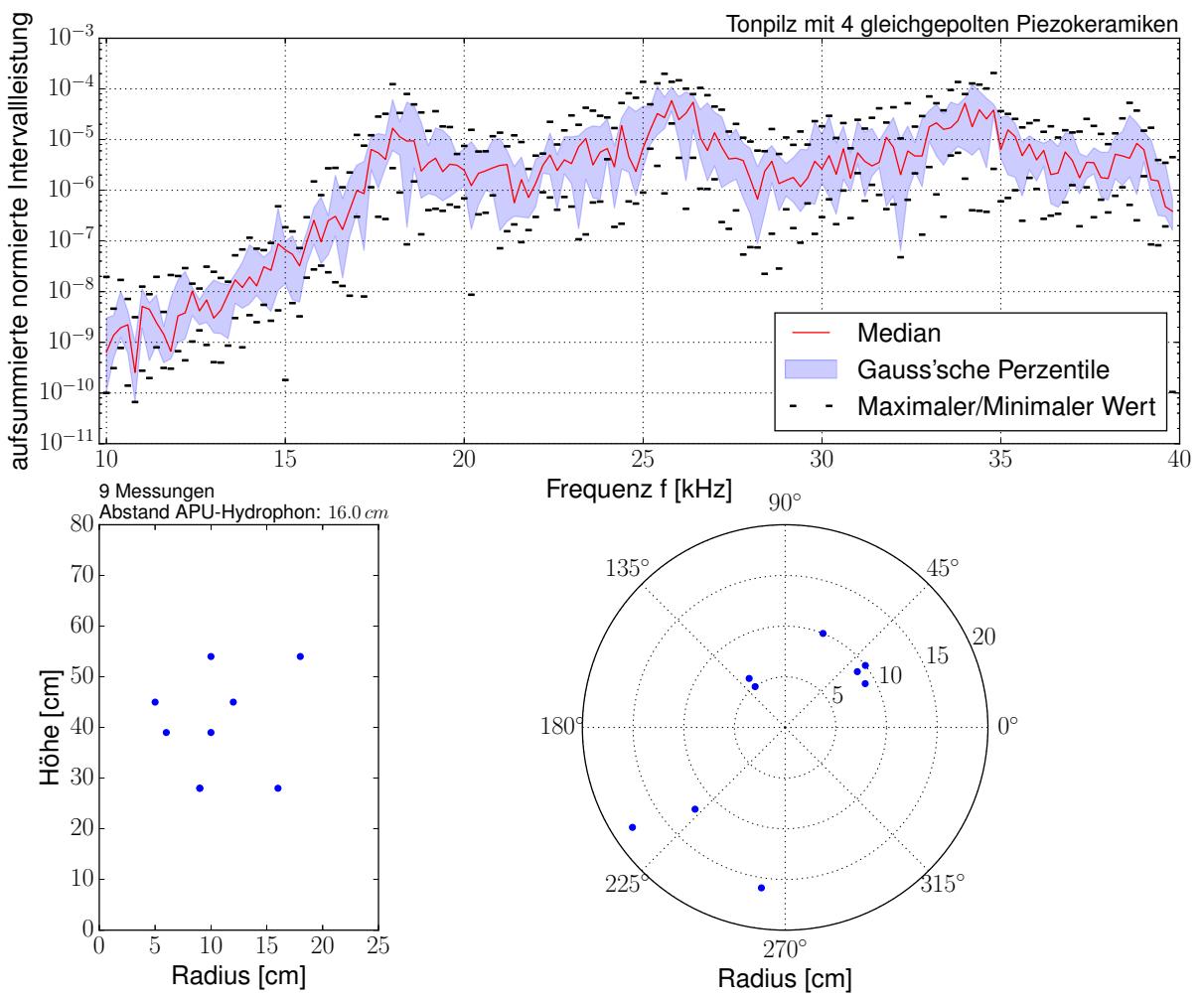


Abbildung A.8.: Details zur Messung mittels der Positionsvariation bei der Tonpilz 4er-Konfiguration

A. Anhang

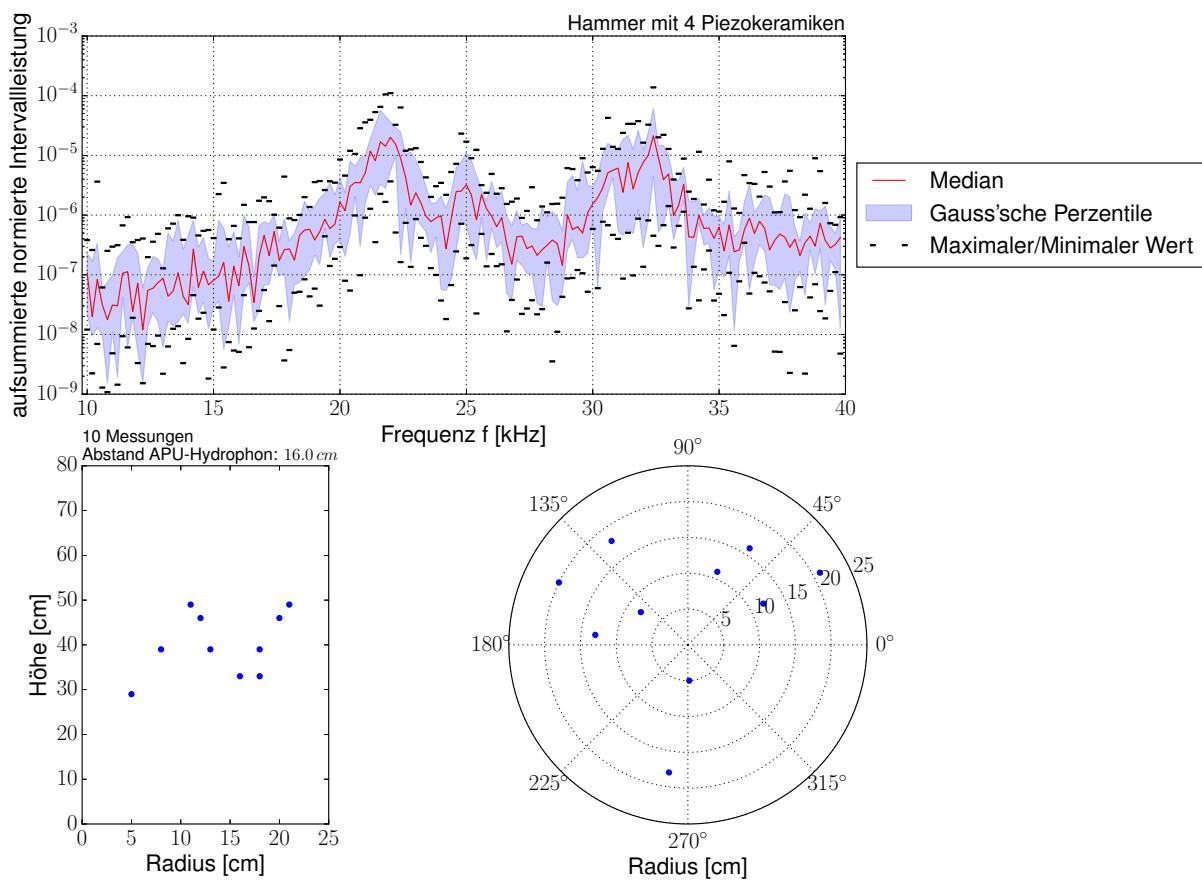


Abbildung A.9.: Details zur Messung mittels der Positionsvariation bei der Hammer 4er-Konfiguration

Abbildungsverzeichnis

2.1. Akustisches Lokalisierungssystem	4
2.2. Aufbau einer Autonomen Pingereinheit	4
3.1. Skizze zur Reflexion und Transmission einer Schallwelle beim Übergang von Medium 1 in Medium 2 entlang einer Ebene [LSW09, S. 64]	7
3.2. Winkelabhängigkeit des Reflexionsfaktors beim Übergang von Wasser in Luft	8
3.3. Veranschaulichung des piezoelektrischen Effekts[LSW09]	10
3.4. Skizze eines Dickenschwingers[Len+10]	10
3.5. Aufbauskizze ohne elektrische Kontaktierung: Links das Standard-Tonpilz-Design, rechts das in dieser Arbeit verwendete Design [Lin16, adaptiert]	12
3.6. Vereinfachtes mechanisches Modell zur Beschreibung des Hammer-Schallwandlers	13
3.7. Aufbauskizze ohne elektrische Kontaktierung: Links das Standard-Hammer-Design, rechts das in dieser Arbeit verwendete Design [Lin16, adaptiert]	14
4.1. Schematische Skizze der Messapparatur	16
4.2. Foto einer verwendeten Piezokeramikscheibe	16
4.3. Vergleich der drei Aufbauten der Schallwandler [Lin16]	18
5.1. Typisches gesendetes und empfangenes akustisches Signal	19
5.2. Spektrale Leistungsdichte einer Messung bei direkter Einkopplung bei Segmentlänge 500 und Intervallbreite 2 kHz	23
6.1. Versuchsaufbau zu Messungen der Tonpilz 2er-Konfiguration bei direkter Ankopplung des PVDF-Sensors an den APU-Kopf	25
6.2. Reproduktion bei direkter Ankopplung des PVDF-Sensor an den Schmelzkopf	26
6.3. Einfluss der Unterlage des PVDF-Sensors	27
6.4. Intervalleistungsspektren zu verschiedenen Anziehdrehmomenten mit Belastungsanalyse	29
7.1. Versuchsaufbau zu Messungen im Wasserbehälter	31
7.2. PVDF-Hydrofon für die Messungen im Wasserbehälter	32
7.3. Frequenzcharakteristik des Audioverstärkers	33
7.4. Formcharakteristik des Audioverstärkers	34
7.5. Elektromagnetische Störung bei Messung im Wasserbecken	35
7.6. Unabhängigkeit der elektromagnetischen Störung von der Position im Becken	36
7.7. Lineare Abhängigkeit der Amplitude des Störsignals von der Sendefrequenz	37
7.8. Anteil der elektromagnetischen Störung bei der Tonpilz 2er-Konfiguration mit geschirmtem Aufbau	39
7.9. Anteil der elektromagnetischen Störung bei der Tonpilz 4er-Konfiguration mit geschirmtem Aufbau	40
7.10. Anteil der elektromagnetischen Störung beim Hammer-Schallwandler mit geschirmtem Aufbau	41

Abbildungsverzeichnis

7.11. Leistungseinbrueche aufgrund destruktiver Interferenz	42
7.12. Reflexionen nach 3 Sinus-Oszillationen als Direktsignal	43
7.13. Vergleich der Auswertungszeitfenster 0.3 ms und 15 ms	44
7.14. Intervallleistungsspektren mit und ohne Noppenschaumauskleidung	45
7.15. Reproduktionsmessung der aufsummierten, normierten Intervallleistung mit 50 Messungen bei einer Messposition	46
7.16. Beispiel einer Messung mit Positionsvariation für die Tonpliz 2er-Konfiguration .	47
7.17. Intervallleistungsspektrum der Tonpilz 2er-Konfiguration bei zwei unterschiedli- chen Messungen mit Positionsvariation	49
7.18. Intervallleistungsspektrum der Tonpilz 2er-Konfiguration bei zwei unterschiedli- chen Messungen mit Positionsvariation und einem Wechsel der Gewindestange .	50
8.1. Vergleich der Messungen zur 2er- und 4er-Konfiguration des Tonpilzschallwandlers	52
8.2. Vergleich zwischen Hammer- und Tonpilz-Schallwandler	54
A.1. Werkstoffeigenschaften der Piezokeramiken	I
A.3. Platzierung des PVDF-Sensors unter dem Kopf	VI
A.5. Anordnung von APU und Hydrofon zur Untersuchung der elektromagnetischen Störung	VIII
A.6. Schirmung des Steckers an der APU mittels Aluminiumfolie	IX
A.7. Details zur Messung mittels der Positionsvariation bei der Tonpilz 2er-Konfiguration	X
A.8. Details zur Messung mittels der Positionsvariation bei der Tonpilz 4er-Konfiguration	XI
A.9. Details zur Messung mittels der Positionsvariation bei der Hammer 4er-Konfiguration	XII

Tabellenverzeichnis

4.1. Eigenschaften des Schmelzkopfes [14; Bar]	17
4.2. Eigenschaften der Massescheiben [Her16]	17
6.1. Übersicht der Messeinstellungen zu den Intervallleistungspektren mit verschiedenen Anziehdrehmomenten	28