Aktive Reduzierung der Schallreflexion an Oberflächen in Wasser

Johannes Timmermann[1], Tom Avsic[2], Delf Sachau[3], Ingo Martens[4]

[1] *Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Email: johannes.timmermann@hsu-hh.de*

[2] *Thyssenkrupp Marine Systems, Email: tom.avsic@thyssenkrupp.com*

[3] *Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Email: delf.sachau@hsu-hh.de*

[4] *Thyssenkrupp Marine Systems, Email: ingo.martens@thyssenkrupp.com*

Einleitung

Unter Wasser erfolgt die akustische Detektion von Wasserfahrzeugen normalerweise durch Sonare. Passivsonare detektieren die von einem Fahrzeug erzeugte und abgestrahlte Schallleistung. Aktivsonare hingegen senden ein Schallsignal aus und detektieren die zurückkommenden Echos. Durch eine weitere Auswertung dieser Echos lassen sich die Positionen von Fahrzeugen im Wasser bestimmen. Das Zielmaß eines Fahrzeugs gibt dabei an, wie gut ein Fahrzeug das gesendete Signal reflektiert [1]. Aus diversen Gründen ist es von Interesse, das Zielmaß zu Reduzieren und sich somit vor der Aufklärung zu tarnen.
Klassischerweise werden zur Reduzierung der akustischen Reflexion schallabsorbierende Materialien verwendet. Im Unterwasserbereich ist das für hohe Frequenzen durchaus üblich [2]. Mit der Verringerung der Sonarfrequenz nehmen die benötigten Schichtdicken der absorbierenden Materialien zu und so wird es zunehmend schwierig diese auf die Außenhaut von Wasserfahrzeugen aufzubringen. Daher kann es Sinnvoll sein die Zielmaßreduktion, anstatt mit absorbierenden Materialien, aus einer Kombination von Formgebung und schallreflektierenden Materialien zu erreichen [3]. Mit dieser Technik wird der Schall weg von der Sonarrichtung reflektiert. Für sehr niedrige Frequenzen reflektiert die Formgebung nicht mehr gerichtet genug, sondern streut vielmehr. Für diesen Frequenzbereich können aktive Maßnahmen Abhilfe schaffen, wie sie beispielsweise bereits zur Reduktion des ausgesendeten Schalls zur Verfügung stehen [4]. Aus diesem Grund soll ein aktives System zur Reduzierung des Zielmaßes entwickelt werden. Dieses mechatronische System soll die Schallreflexionen an der Fahrzeugoberfläche reduzieren, ohne dabei die Funktion des Fahrzeuges zu beeinträchtigen. Dazu müssen Sensoren und Aktoren am Fahrzeug angebracht werden. Sobald die Sensoren ein einlaufendes Signal detektieren, müssen die Aktoren gezielt angesteuert werden, um eine Reflexion der Schallwellen an der Fahrzeugoberfläche zu minimieren.
In dieser Studie wurde ein Demonstrator eines aktiven Systems zur Senkung des Reflexionsfaktors am Übergang zwischen Wasser und Stahl entwickelt. Der Messaufbau basiert auf einem mit Wasser gefüllten Impedanzrohr. Ein Ende des Rohres ist mit einem Tonpliz als primären Aktor versehen. Der gegenüber liegende Rohrabschluss repräsentiert die Fahrzeugoberfläche, auf der eine dünne Piezokeramik als sekundären Aktor angebracht ist. Sensoren im Rohr messen die auftretenden Schalldruckverhältnisse. Die Ansteuerung des Piezoaktors erfolgt mit einem adaptiven Regler, dessen Wirksamkeit in einer Versuchsreihe für stationäre tonale Signale nachgewiesen wurde.

Messaufbau

Das verwendete Impedanzrohr besteht aus mehreren Modulen mit insgesamt 6 Hydrofonen der Bezeichnung *Benthos AQ-4*. Bei dem an einen Rohrende montierten Aktor handelt es sich um einen Tonpilz. Der Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Der für die Untersuchungen

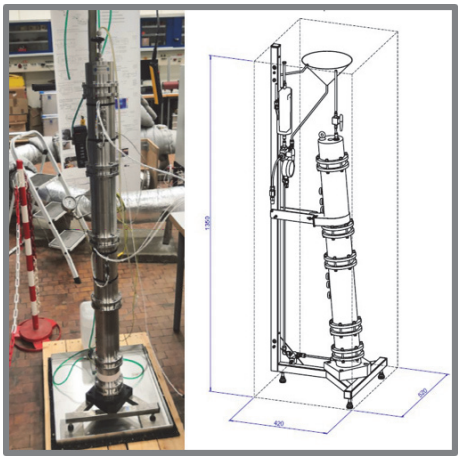

Abbildung 1: Messaufbau des Impedanzrohrs mit schematischer Skizze

benötigte zweite Aktor wurde in Form eines experimentellen Piezoaktors realisiert. Dazu wurde eine Piezokeramik des Herstellers *Physik Instrumente* verwendet, die in eine Vergussmasse des Typs *AptFlex F21* des Herstellers *Precision Acoustics* eingebettet wurde. Diese Vergussmasse hat vergleichbare akustische Eigenschaften wie Wasser. Das Vergießen erfolgte in einem neu angefertigten Abschlusssegment des Rohres, welches den bestehenden Abschluss ersetzt. Die Auslegung, Konstruktion und Montage des Piezoaktors erfolgte in [5]. Eine Zusammenfassung der Arbeitsschritte zum Einbau der Piezokeramik im Rohrabschluss ist in Abbildung 2 dargestellt. Links in Abbildung 2 ist die Piezokeramik in einer Fotografie und einer schematischen Zeichnung abgebildet. Die Keramik selbst hat einen Durchmesser von 35 mm und eine Dicke von 0,2 mm. Dadurch lässt sich ein Aktor von besonders geringer Bauhöhe realisieren. Die rechte Seite zeigt das Einsetzen und Vergießen der Piezokeramik in das Abschlusssegment des Impedanzrohrs. Durch den Einsatz der Vergussmasse wird die Keramik nicht nur vor mechanischer und chemischer Beschädigung geschützt, sondern auch die Kabeldurchführung abgedichtet.

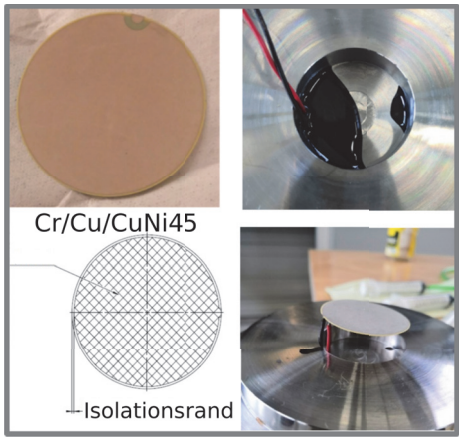

Abbildung 2: Einbau der Piezokeramik mit Vergussmasse im Rohrabschluss

Da die *Benthos AQ-4* Hydrofone bei den Messungen stark unterschiedliche Empfindlichkeiten aufweisen, wurden sie durch Hydrofone des Herstellers *PCB Piezotronic* ausgetauscht. Für die Sensoren mit der Bezeichnung *S112A22* und *106B* wurde ein neues Rohrsegment konstruiert und angefertigt. Beide Druckaufnehmer basieren auf dem piezoelektrischen Effekt von Quarzen, wie es bei vielen modernen Hydrofonen der Fall ist [6]. Die Abbildung 3 zeigt eine schematische Zeichnung des Rohrsegmentes und dessen Integration im Messaufbau. In dem Rohrsegment sind drei Bohrun-

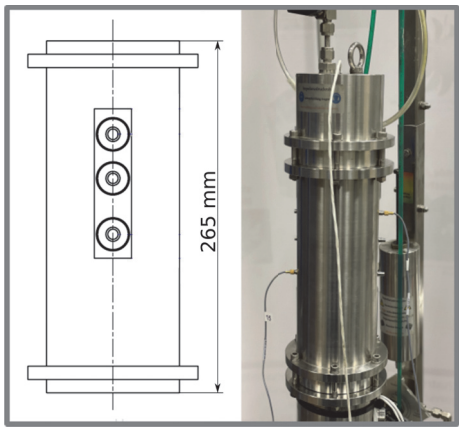

Abbildung 3: Angepasstes Rohrsegment mit *PCB* Hydrofonen

gen für jedes der beiden Hydrofone vorgesehen. Diese sind genau gegenüberliegend angeordnet, siehe Abbildung 3. Dadurch können die Positionen der Sensoren gewechselt oder weitere Sensoren hinzugefügt werden. Das Übertragungsverhalten der *PCB* Hydrofone wurde daraufhin untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Empfindlichkeiten des *PCB S112A22* und *PCB 106B* bezogen auf die Ansteuerung des Aktors zeigen über alle Frequenzen eine gute Übereinstimmung. Zusammen mit dem experimentellen Piezoaktor bildet dieser Messaufbau die Basis der Messungen der aktiven Zielmaßreduzierung. Zur Ansteuerung der Aktoren für die Versuche und der Berechnungen wird eine *dSpace MicroLabBox* verwendet. Diese verfügt über 16

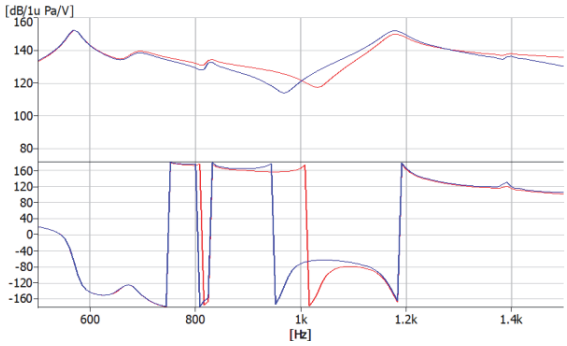

Abbildung 4: Übertragungsverhalten von *PCB S112A22* (rot) und *PCB 106B* (blau)

Bit Analog-Digital-Wandler (ADC) und Digital-Analog-Wandler (DAC). Die gewählte Abtastrate beträgt für alle Versuche 8 kHz. Als Aliasing- und Rekonstruktionsfilter werden analoge Besselfilter 2. Ordnung mit einer Eckfrequenz von 2 kHz verwendet. Zur Ansteuerung des Primär- und Sekundäraktors wird ein *Brüel & Kjaer BK 2732* verwendet. Die Aufnahme der Messdaten erfolgt mit *Pulse Labshop*.

Reglerentwurf

Sollen Reflexionen an Oberflächen minimiert werden, muss der Reflexionsfaktor und damit der Anteil der reflektierten Schallwelle reduziert werden. Dafür ist ein mathematisches Modell der Druckverteilung im Medium notwendig. Durch das Konzept der Wellentrennung kann tonaler Schall in einem Impedanzrohr in eine hinlaufende und eine reflektierte und damit rücklaufende Welle zerlegt werden [7]. Dazu muss der Druck an zwei Positionen im Rohr gemessen werden. Die Abbildung 5 ist aus der DIN EN ISO 10534-2 entnommen, die primär zur Bestimmung des Absorptionsgrades von Materialien genutzt wird. Die beiden Druckaufnehmer an Position 1

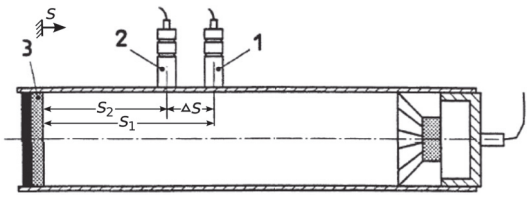

Abbildung 5: Impedanzrohr gemäß DIN EN ISO 10534-2 [8]

und 2 werden in dieser Studie durch zwei Hydrofone realisiert. An der Position 3 wird in der DIN EN ISO 10534-2 die Materialprobe eingesetzt, welche hier durch den zuvor beschriebenen Piezoaktor ersetzt wird. Die hinlaufende und reflektierte Schallwelle können innerhalb des Impedanzrohrs mit der Gleichung 1 dargestellt werden.

$$\underline{p}(s,t) = \underline{A}e^{j(\omega t - ks)} + \underline{B}e^{j(\omega t + ks)} \tag{1}$$

Bei $\underline{A}$ und $\underline{B}$ handelt es sich jeweils um die komplexen Amplituden der hin- und rücklaufenden Welle. Der Parameter s gibt den Ort an und t die Zeit. Die Wellenzahl k beschreibt das Verhältnis der Kreisfrequenz ω und der

Schallgeschwindigkeit im Medium c.

$$k = \frac{w}{c} \tag{2}$$

Das Verhältnis aus $\underline{A}$ und $\underline{B}$ ergibt nach

$$\underline{r} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}} \tag{3}$$

den komplexen Reflexionsfaktor $\underline{r}$. Anstatt den Reflexionsfaktor und Absorptionsgrad einer Materialprobe zu messen, soll der Reflexionsfaktor mit einem aktiven Rohrabschlusses gezielt manipuliert werden. Die komplexen Drücke $\underline{p}_{s_1}$ und $\underline{p}_{s_2}$ im Frequenzbereich ergeben sich aus der Fouriertransformation der Zeitsignale der Hydrofone. Durch jeweiliges Einsetzen in Gleichung 1 ergeben sich $\underline{A}$ und $\underline{B}$ zu:

$$\underline{A} = \frac{\underline{p}_{s_1} e^{jks_2} - \underline{p}_{s_2} e^{jks_1}}{e^{jk(s_2-s_1)} - e^{jk(s_1-s_2)}} \tag{4}$$

$$\underline{B} = \frac{\underline{p}_{s_1} e^{-jks_2} - \underline{p}_{s_2} e^{-jks_1}}{e^{jk(s_1-s_2)} - e^{jk(s_2-s_1)}} \tag{5}$$

Die Wellentrennung kann auch im Zeitbereich durchgeführt werden, dafür ist jedoch eine starke Bandpassfilterung der Drucksignale für die jeweils zu untersuchende Frequenz notwendig. Eine Berechnung im Zeitbereich hätte jedoch das Potential Signallaufzeiten zu verkürzen, da auf eine Blockverarbeitung der Signale verzichtet wird. Zusammen mit der Auswahl einer geeigneten Rechenplattform, z.B. eines Field Programmable Gate Arrays (FPGA), ließe sich das System auf sehr niedrige Signallaufzeiten hin optimieren.
Wird die komplexe Amplitude der rücklaufenden Schallwelle $\underline{B}$ im Impedanzrohr minimiert, sinkt der Reflexionsfaktor für die entsprechende Frequenz. Dazu wird in dieser Studie ein Filtered-x Least Mean Square (FxLMS) Algorithmus verwendet. Das Blockschaltbild für den FxLMS im Frequenzbereich ist in Abbildung 6 dargestellt. *x(n)* stellt das Referenzsignal da,

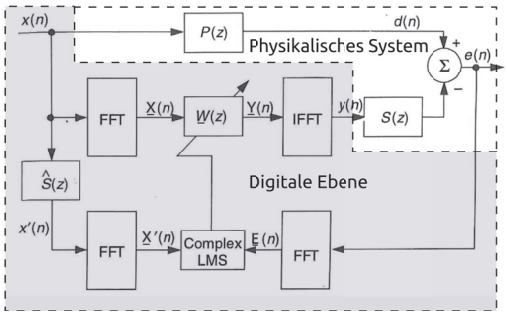

Abbildung 6: FxLMS im Frequenzbereich gemäß [9]

welches normalerweise durch einen vorgelagerten Sensor gemessen wird. *P(z)* beschreibt die physikalische Regelstrecke des Systems, dessen Output wird mit $d(n)$ bezeichnet wird. $e(n)$ beschreibt das Fehlersignal, welches zu minimieren ist. Das Sekundärstreckenmodell $\hat{S}(z)$ der Sekundärstrecke $S(z)$ kann durch eine offline Sekundärstreckenidentifikation, z.B. durch einen Least-Mean-Square (LMS) Algorithmus, ermittelt werden. Bei $\underline{W}(z)$ handelt es sich um das adaptive Filter. Wird der FxLMS wie in Abbildung 6 im Frequenzbereich umgesetzt, müssen das Referenzsignal $x(n)$, das gefilterte Referenzsignal $x'(n)$ und das Fehlersignal $e(n)$ jeweils gepuffert und dann mit einer FFT in den Frequenzbereich überführt werden. Der Ausgang des Filters muss anschließen wieder mit einer inversen FFT (IFFT) in den Zeitbereich rücktransformiert werden. Die ausführlichen theoretischen Grundlagen zum FxLMS können aus [9] entnommen werden. Die Regelung durch den FxLMS im Frequenzbereich erfolgt in zwei Stufen. Zuerst wird die Sekundärstrecke mittels LMS Algorithmus ermittelt. Dies ist in [9] im Kapitel zur offline Sekundärstreckenidentifizierung beschrieben. Das Sekundärstreckenmodell beinhaltet einen komplexen statischen Filterkoeffizient, dessen Amplitude und Phase die Übertragung der Sekundärstrecke beschreiben. Anschließend erfolgt die Regelung mit dem FxLMS und der reflektierten Schallwelle als zu reduzierende Größe. Dazu wird ein tonales Signal auf den Primäraktor gegeben. Die Abbildung 7 zeigt einen Überblick des *Matlab/Simulink* Reglermodells in einer schematischen Zeichnung. Die Si-

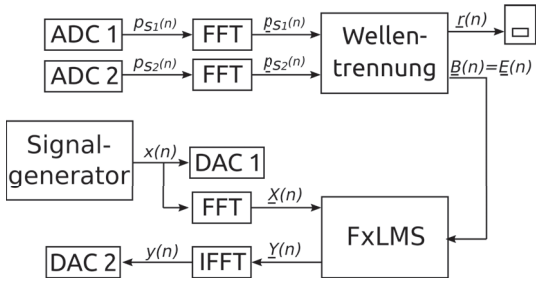

Abbildung 7: Funktionsskizze des *Matlab/Simulink* Modells des Reglers

gnale der Hydrofone 1 und 2 erreichen nach analoger Filterung und Verstärkung die ADCs 1 und 2. Sie werden anschließend jeweils per FFT verarbeitet, bevor sie an einen *Matlab* Funktionsblock übergeben werden. Der hinterlegte Code verarbeitet Signale nach Gleichung 1 bis 5 der Wellentrennung. Als Ergebnis wird die errechnete komplexe Amplitude der reflektierten Welle $\underline{B}$ ausgegeben und dem FxLMS als Fehlersignal zugeführt. $\underline{B}$ entspricht damit dem Fehler $\underline{E}(n)$ aus Abbildung 6. Der FxLMS Block aus Abbildung 7 einspricht damit der digitalen Ebene aus Abbildung 6 ohne die FFTs und IFFT. Das adaptive Filter des FxLMS operiert mit einem komplexen Filterkoeffizienten. Alle benötigten Referenzsignale werden, wie in 7 dargestellt, aus dem Signalgenerator entnommen. DAC1 ist mit dem Tonpilz und DAC2 mit dem Piezoaktor verbunden.

Ergebnisse

Die Bewertung des Regelungserfolges erfolgt über den Betrag des Reflexionsfaktors und den gemessenen Druck an den Hydrofonen an Position 1 und 2. Die Abbildung 8 zeigt den über *Pulse Labshop* ermittelten Betrag des Reflexionsfaktors für die zu untersuchende Frequenz in den verschiedenen Betriebszuständen des Sy-

stems. Bei deaktivierter Regelung wird ein Reflexions-

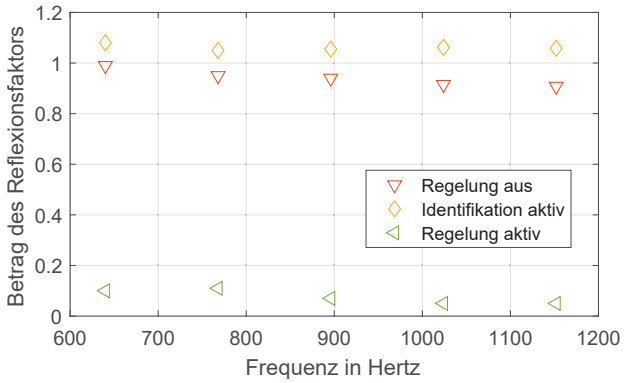

Abbildung 8: Betrag des Reflexionsfaktors während der Sekundärstreckenidentifizierung, ohne Regelung und mit Regelung

faktor von knapp unter 1 gemessen. Dieser sinkt mit steigender Frequenz und deutet somit auf eine größere Dämpfung höherer Frequenzen des Impedanzrohrs hin. Bei deaktivierter Regelung wird nur der primäre Aktor (Tonpilz) über den Signalgenerator angesteuert, das Signal für den Piezoaktor wird in der *MicroLabbox* zu 0 gesetzt. Während des Prozesses der Identifizierung wird das Sekundärstreckenmodell ermittelt. Dabei wird nur der Piezoaktor über den Signalgenerator angesteuert und das Signal für den Primäraktor zu 0 gesetzt. Es wird ein Reflexionsfaktor von größer 1 gemessen. Dies ist plausibel, da der betrachtete Rohrabschluss nun eigenständig Schall abstrahlt. Folglich ist die gemessene rücklaufende Amplitude der Schallwelle größer als die hinlaufende. Bei aktiver Regelung werden Reflexionsfaktoren von bis zu unter 0,1 gemessen. Der gemessene Reflexionsfaktor sinkt dabei mit steigender Frequenz. In der Abbildung 9 ist der gemessene Schalldruck an den zwei Hydrofonen mit und ohne aktivierter Regelung dargestellt. Ein Reflexi-

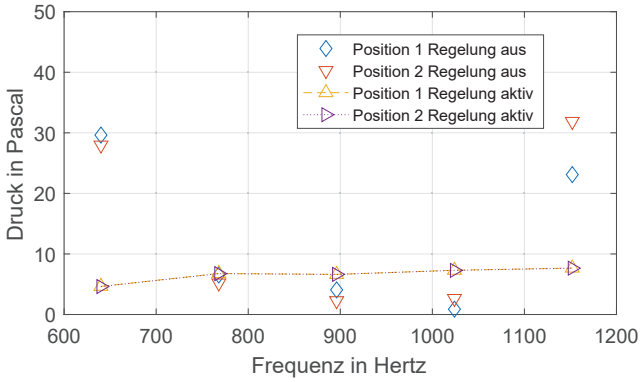

Abbildung 9: Vergleich des gemessenen Schalldrucks an Hydrofonposition 1 und 2

onsfaktor von 0 bedeutet, dass nur die hinlaufende Welle vorliegt, siehe Gleichung 1 bis 3. Ohne die rücklaufende Welle bildet sich folglich kein stehendes Wellenfeld im Impedanzrohr aus. Die gemessenen Drücke sollten sich damit an den verschiedenen Positionen im Impedanzrohr angleichen. Dieses Verhalten ist in Abbildung 9 deutlich zu erkennen. Der sich durch die Regelung einstellende Schalldruck steigt dabei mit zunehmender Frequenz an, was auf eine steigende Effizienz des Tonpilzes bei höheren Frequenzen hin deutet.

Fazit

Der bestehende Messaufbau des mit Wasser gefüllten Impedanzrohrs konnte in dieser Studie durch geeignete Sensorik und eine experimentellen Piezoaktor deutlich verbessert werden. Die Wirksamkeit des Aktors wurde dabei im Versuch nachgewiesen. Das Konzept der Wellentrennung wurde verwendet, um auf Basis eines FxLMS Reglers im Frequenzbereich Schallreflexionen am Rohrabschluss zu minimieren. Die Ergebnisse zeigen eine frequenzabhängige Reduktion des Reflexionsfaktors auf bis zu unter 0,1. Die Ergebnisse dieser Studie legen die Basis für weitere Untersuchungen mit zusätzlichen Erweiterungen des Messaufbaus.

Danksagung

Wir danken an dieser Stelle Norbert Hövelmann für seine Unterstützung, Kai Simanowski für seinen Einsatz bei der Messtechnik und Laurin Tobias für die Auslegung und Montage des Piezoaktors.

Literatur

[1] Janßen, M.: Taktische Entscheidungshilfe Signaturmanagementsystem, MarineForum Bd. 5, 2018

[2] Kuhl, W.: Sound Absorption and Sound Absorbers in Water: (Dynamic Properties of Rubber and Rubberlike Substances in the Acoustic Frequency Region, Department of the Navy, Bureau of Ships, 1950

[3] Avsic, T.: An underwater vehicle shape with reduced acoustic backscatter, ICA 2019, 23rd International Congress on Acoustics, integrating 4th EAA Euroregio, Aachen, 2019

[4] Sachau, D.; Jukkert S.; Hövelmann, N. :Development and experimental verification of a robust active noise control system for a diesel engine in submarines, Journal of Sound and Vibration, 2016

[5] Tobias, L.: Inbetriebnahme eines Versuchsstandes und Durchführung von Versuchen zur aktiven Zielmaßreduzierung, Masterarbeit, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 2020

[6] Butler, J.L; Sherman, C.H.: Transducers and Arrays for Underwater Sound, Second Edition, The ASA Press, 2016

[7] Möser, M.: Technische Akustik, Springer-Verlag, 2015

[8] DIN EN ISO 10534-2: Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion

[9] Kuo, S. M. und Morgen, D. R.: Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations. John Wiley & Sons, Inc., 1996