Untersuchungen zum Zielmaß skalierter resonanter Körper

Arne Stoltenberg, Ingo Schäfer

Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71), Akustische Modellierung, Berliner Strasse 115, 24340 Eckernförde, Deutschland

Email: ArneStoltenberg@Bundeswehr.org, Ingo5Schaefer@Bundeswehr.org

Einleitung

Das Zielmaß ist der richtungsabhängig zurückgestreute Anteil der Schallintensität unter Wasser, der die Sichtbarkeit eines Objektes für aktive Sonare bestimmt. Die Ermittlung und gezielte Beeinflussung des Zielmaßes eines Objektes ist ein dominantes Thema in der Wasserschallforschung. Aktuelle numerische Rechenmodelle erlauben es, mit verschiedenen Ansätzen zur Lösung der Helmholtzgleichung das Zielmaß eines nahezu beliebig strukturierten Objektes recht erfolgreich zu bestimmen. Um neue numerische Methoden zu referenzieren, werden vergleichende Messdaten aus (meist skalierten) Referenzierungsexperimenten benötigt.

Im hier vorgestellten Beitrag zur DAGA2021 wurde das Zielmaß von zwei einseitig geschlossenen dünnwandigen Aluminiumzylindern experimentell bestimmt und mit den theoretisch zu erwartenden Zielmaßen verglichen.

Grundlagen

Die Sonargleichung lautet in ihrer einfachsten Form:

$$\mathrm{RL} = \mathrm{SL} - 2 \cdot \mathrm{TL} + \mathrm{TS},$$

mit RL = Empfangspegel (receive level), SL = Sendepegel (source level), TL = Ausbreitungsverlust (transmission loss) und TS = Zielmaß (target strength) [1]. Umgestellt nach dem Zielmaß TS ergibt sich:

$$\mathrm{TS} = \mathrm{RL} - \mathrm{SL} + 2 \cdot \mathrm{TL}$$

Ist der (sphärische) Ausbreitungsverlust $\mathrm{TL} = 20 \cdot \log_{10}(r/r_0)$ vernachlässigbar (im Wandlerabstand von 1 m ergibt sich bei $r_0 = 1$ m ein TL von 0 dB), gilt TS = RL − SL. Dies entspricht dem Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Schallintensität am Objekt: $\mathrm{TS} = 10 \cdot \log_{10}(I_{\mathrm{refl}}/I_{\mathrm{inc}})$. Das Zielmaß TS ist damit über die Messung des Sendepegels SL und des Empfangspegels RL in einem Meter Entfernung experimentell bestimmbar.

Tankexperiment

Der Wassertank der WTD 71 ist ein oben offener $5 \times 5 \times 3\,\mathrm{m}^3$ großer Tank aus Beton mit Schallabsorbern an den Wänden zur Unterdrückung von Reflexionen. Platziert man eine monstatische Sender/Empfängereinheit in der Mitte des Wasservolumens treffen die ersten Reflexionen von Oberfläche/Boden nach einer Laufzeit von $2 \times 1.5\,\mathrm{m} / 1468\,\mathrm{m/s} = 2$ ms am Empfänger ein.

Die Zielmaßobjekte bestanden aus je einem Aluminiumhohlzylinder aus 0.2 mm dünnem Aluminiumblech mit einer einseitigen Halbkugelkalotte aus etwa 1.0 bis 1.5 mm dickem Aluminiumblech. Um die Schwingungsmoden der Zylinderhülle nicht zu beeinträchtigen, wurde an dieser Kugelkalotte des Körpers jeweils ein Halter aus Stahldraht angeklebt.

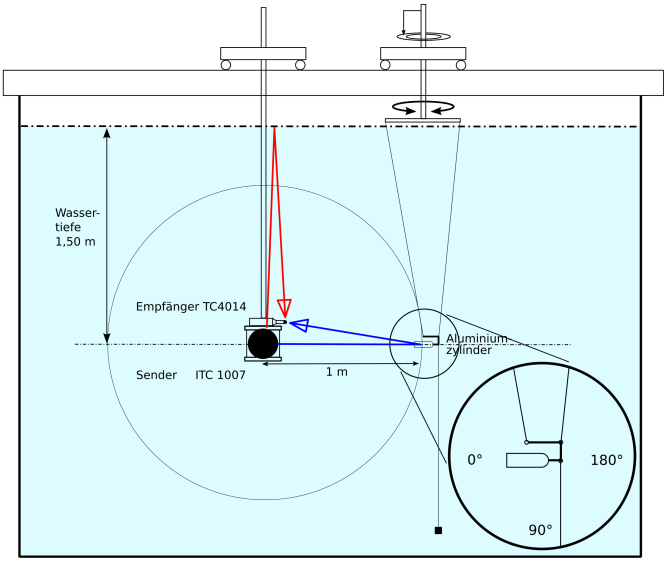

Abbildung 1: Versuchsaufbau: Sender/Empfänger-Kombination und Zielobjekt in der Mitte des Tanks zur Maximierung der freien Weglänge. Laufweg der Reflexion des Objektes (blau), Laufweg der Reflexion an der Oberfläche (rot).

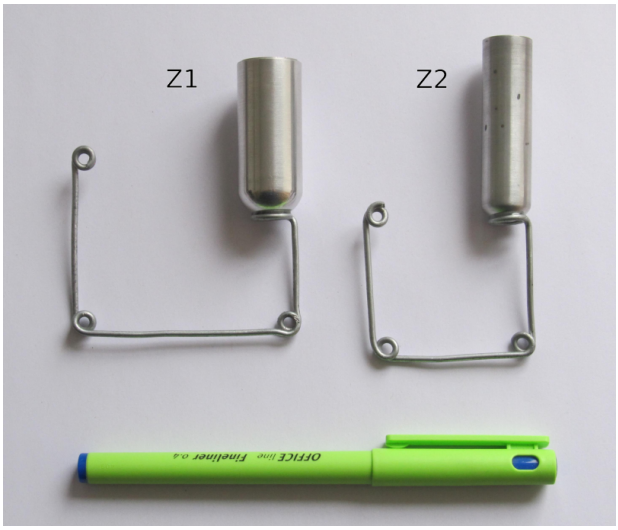

Abbildung 2: Zwei Zielmaßobjekte mit Drahthaltern

Die Abmessungen der beiden Objekte waren:

Objekt	Durchmesser	Länge
Z1	19.7 mm	46 mm
Z2	15.3 mm	55 mm

Im folgenden wird nur Z1 weiter betrachtet, da sich im Vergleich mit Z2 keine qualitativ anderen Ergebnisse ergaben.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, wurde je eines dieser Halter/Zylinderobjekte mit Nylonfäden in der halben Wassertiefe des Tanks in einem Meter Abstand zum Sender/Empfänger platziert. Das Objekt wurde über einem Drehkranz in Schritten von $5° \pm 0.1°$ definiert gedreht und seine Reflexionen für jeden Aspektwinkel als Zeitreihen des Hydrofons aufgezeichnet. Separiert man aus den Zeitreihen den reflektierten Anteil des Objektes und stellt das Fourierspektrum dieses Abschnitts über dem Aspektwinkel dar, erhält man Abbildung 3. Sie zeigt das Zielmaß des Körpers über einem Aspektwinkel von 0 - 180°. Hierbei entspricht 0° Aspektwinkel der Richtung des Resonators mit der offenen Seite zum Sender/Empfänger hin ausgerichtet und 180° mit der geschlossenen Seite zum Sender/Empfänger.

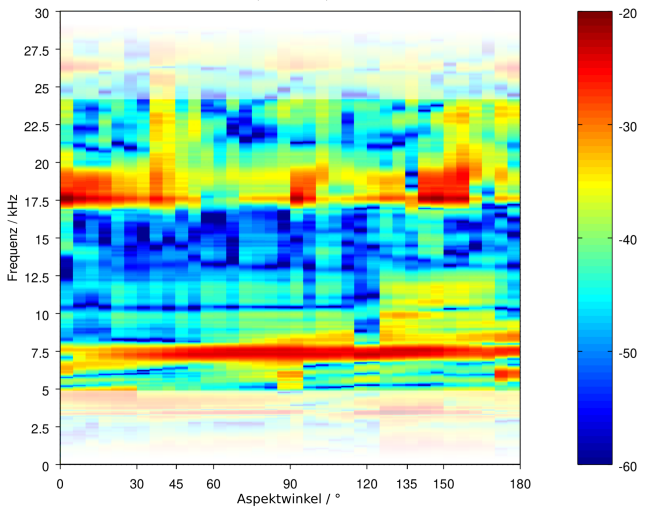

Abbildung 3: Aspektwinkelabhängiges Zielmaß des Körpers Z1. Die Frequenzbereiche ausserhalb des Maximums des Sendesignals sind ausgegraut, da in diesen Bereichen mit höherem Ergebnisrauschen zu rechnen ist.

Als breitbandiges Sendesignal wurde ein linear frequenzmoduliertes Signal im Frequenzbereich 7 - 22 kHz mit einer Dauer von 0.85 ms ausgewählt. Da der Empfänger direkt neben dem Sendewandler platziert war, wurde zunächst der direkte Puls empfangen, aus ihm wurde die einfallende Schallintensität am Objekt ermittelt. Dann traf das reflektierte Signal der Zielmaßobjekte am Empfänger ein. Es musste abgeklungen sein, bevor die Reflexionen von den Berandungen des Tanks beim Empfänger eintrafen. Nur der reflektierte Anteil des Zielmaßobjektes wurde spektral ausgewertet und ins Verhältnis zum Spektrum des einfallenden Pulses gesetzt.

Numerische Modellierung

Mit Hilfe von gekoppelten FEM/BEM Methoden zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens der Aluminiumresonatoren und ihrer Abstrahlung von Schallenergie in das Wasser wurden die in Abbildung 5 dargestellten abstrahlfähigen Eigenmoden und Eigenfrequenzen des Z1 gefunden:

Z1 Moden / kHz	1	2	3
Helmholtzmoden	6.35	12.74	17.84
Zylindermoden	10.38	15.76	
Biegemoden	11.56	16.53	

Hierbei sind die Zylindermoden, die in Abbildung 5 mit den lila gefärbten Pfeilen gekennzeichneten Frequenzen nicht ins Fernfeld abstrahlfähig, die Helmholtz- und Biegemoden dagegen schon. Die Helmholtzmoden sind hier lediglich so genannt, denn echte Helmholtzmoden bilden sich bei schallharten Hohlkörpern nur bei den Wellenlängen (bzw. passenden Frequenzen) heraus, deren Viertel der Wellenlänge (und ungradzahlige Vielfache davon) gerade in die Resonatorlänge passen. Hier sind es modifizierte Helmholtzmoden, denn die Resonatoren sind nicht streng schallhart, sondern verformen sich durch das Medium, wie in Abbildung 5 überhöht dargestellt.

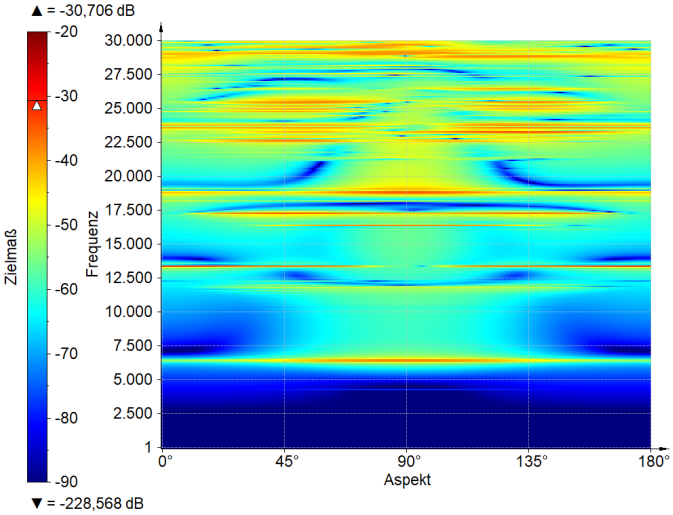

Abbildung 4: Berechnetes Zielmaß des Körpers Z1 über dem Aspektwinkel aufgetragen. Es sind die verschiedenen Moden und ihre Abstrahlrichtungen (längs und quer zur Zylinderstruktur) erkennbar.

Vergleich der Zielmaßergebnisse

Der Vergleich der Zielmaßwerte der numerischen Modellierung und der experimentell ermittelten Werte jeweils bei einem Aspektwinkel von 135° in Abbildung 6 zeigt einige Abweichungen. Die experimentell ermittelte Frequenzlinie bei 7.5 kHz könnte der 1. Helmholtzmode der Modellierung bei 6.5 kHz zugeordnet werden, und die experimentelle Linie bei 17.6 kHz etwa der Frequenz der 3. Helmholtzmode bei 17.8 kHz, die 2. Helmholtzmode der Modellierung bei 12.7 kHz aber konnte in den experimentellen Daten der Messdatenauswertung nicht bestätigt werden, genau wie die rechnerisch ermit-

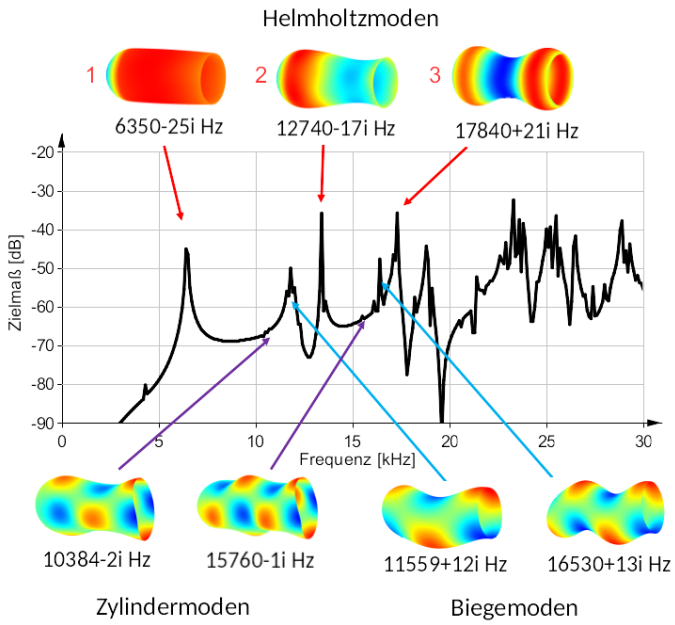

Abbildung 5: Modelliertes Zielmaß des Körpers Z1 bei einem Aspektwinkel von 135°. Es stellen sich verschiedene teilweise abstrahlfähige Schwingungsmoden ein.

telten Linien der Biegemoden nicht. Bei Frequenzen über 22 kHz sind die Messdaten ausserdem mit größeren Unsicherheiten behaftet, so dass über diesen Frequenzbereich keine verlässlichen Aussagen gemacht werden können. Dazu kommt, dass die Richtungsabhängigkeit der Abstrahlung der Moden nur bedingt in den experimentellen Daten wiedergefunden wurde.

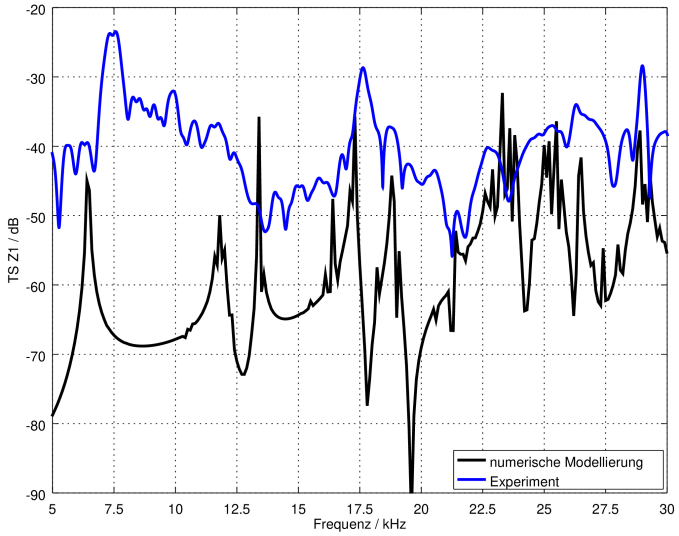

Abbildung 6: Vergleich Zielmaß des Körpers Z1 bei einem Aspektwinkel von 135° von numerischen mit den experimentellen Ergebnissen.

Zusammenfassung

Das Zielmaß zweier zylindrischer Resonatoren aus 0.2 mm dünnen Aluminiumblech wurde zur Referenzierung der numerischen Zielmaßmodellierung winkelaufgelöst durch gekoppelte FEM/BEM bestimmt. In einem Tankexperiment wurde im Frequenzbereich von 7 bis 22 kHz das winkelaufgelöste Zielmaß derselben Körper jeweils als Quotient von reflektierter zu einfallender Schallintensität ermittelt. Die Ergebnisse der numerischen Modellierung und der experimentellen Bestimmung wurden exemplarisch bei einem Aspektwinkel von 135° verglichen. Es ergeben sich lediglich generelle Übereinstimmungen. Dies ist auf unbekannte Materialparameter der Zielmaßobjekte als Problematik der numerischen Modellierung sowie auf fehlende Genauigkeit der experimentellen Daten zurückzuführen. Eine weitere Betrachtung der Problematik wird in genaueren Untersuchungen erfolgen.

Literatur

[1] Robert J. Urik: „Principles of underwater sound", 3rd edition, Pensinsula Publishing, Los Altos, Kalifornien, 1983

[2] Heinz G. Urban: „Handbook of Underwater Acoustic Engineering", STN AtlasElektronik GmbH, Bremen, Germany, 2002