Experiment zur Wasserschall - Messkörper - Kopplung

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

Ein Körper unter Wasser wird durch Schallwellen in Schwingungen versetzt. Ist die Wellenlänge der anregenden Schallwelle sehr groß gegenüber den Körperabmessungen kann er als starrer Körper angesehen werden. Die Amplitude der Körperbewegungen ist dabei bestimmt durch seine Eigenmasse, bzw. bezogen auf sein Volumen durch seine Dichte ρ. Mit dem Ansatz ebener Anregungswellen und eines starren Körpers kann durch eine aufwändige Rechnung das Schnelleamplitudenverhältnis eines Körpers der Dichte ρ_m relativ zur Dichte des umgebenden Mediums ρ_f errechnet werden. Dieses Verhältnis unterscheidet sich je nachdem, ob der Körper sich an der Grenzfläche zu einem anderen Medienhalbraum oder im homogenen Medium befindet.

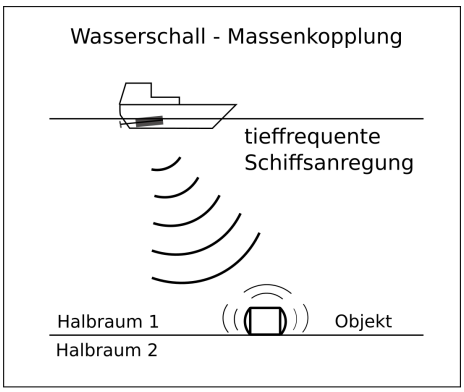

Abbildung 1: Ein Schiff regt einen Körper an einer Halbraumgrenze durch tieffrequenten Wasserschall zu Schwingungen an

In diesem Beitrag zur DAGA 2019 wurde die Amplitudenabschwächung der induzierten Schwingung für einen Körper mit einstellbarer Dichte als Antwort auf eine anregende Wasserschallwelle experimentell untersucht. Ein Aluminium-Hohlkörper wurde im Wassertank der WTD71 durch eine Schallwelle unterschiedlicher Frequenz angeregt und seine Beschleunigung triaxial erfasst. Aus den Beschleunigungen kann seine Antwortgeschwindigkeit errechnet werden. Für drei Raumrichtungen des Körpers, im Wasservolumen aufgehängt und auf einer Bodenplatte abgelegt, wurden die relativen Geschwindigkeiten des Körpers ermittelt und mit den aus der Theorie vorhergesagten relativen Schnelleamplitudenabschwächungen verglichen.

Grundlagen

Mit einem Ansatz einer freien ebenen, anregenden Welle und einem starren, als Massenpunkt schwingendem Körper kann nach einer aufwändigen Rechnung gezeigt werden, dass a) die relative Schnelle eines Körpers im **freien Medium** (Halbraum 1 = 2) mit Formfaktor ϵ:

$$\frac{v_{0m}}{v_{00}} = \frac{(1+\epsilon)\cdot\rho_f}{\epsilon\cdot\rho_f+\rho_m} \tag{F1}$$

mit ρ_f der Dichte des Mediums, ρ_m der mittleren Dichte eines Körpers, v_{00} der Referenzschallschnelle des Mediums und v_{0m} der Geschwindigkeit des durch die Schallwelle angeregten Körpers und b) die relative Schnelle eines Körpers an der **Halbraumgrenze** (Halbraum 1 $\neq$ 2) mit Formfaktor ϵ:

$$\frac{v_{0m}}{v_{00}} = \frac{2\rho_f+\epsilon\cdot(\rho_f+\rho_b)}{2\rho_m+\epsilon\cdot(\rho_f+\rho_b)} \tag{F2}$$

mit ρ_f, ρ_m, ρ_b den Dichten des Mediums, des Körpers und des (rechnerisch als akustisches Fluid angenommenen) Bodens beträgt.

Der Formfaktor ϵ beschreibt hier die Ankopplung der Schnelle des Körpers an eine einfallende Welle. Er beträgt für ein großes dünnes Blech mit Flächennormale in Ausbreitungsrichtung $\epsilon = \infty$ und für einen dünnen Stab in Ausbreitungsrichtung $\epsilon = 0$. Bei der hier verwendeten Zylindergeometrie beträgt er für eine Welle, die auf die Stirnfläche trifft $\epsilon = 0.42$ und für eine Welle, die auf die Mantelfläche trifft $\epsilon = 0.64$. Mit dem passenden Formfaktor ϵ ist die relative Amplitudenminderung v_{0m}/v_{00} abhängig von der Lage des Messkörpers mit den Formeln (F1) und (F2) berechenbar und in den Abbildungen 4 und 5 in schwarz dargestellt.

Tankexperiment

Der Wassertank der WTD71 ist ein 5×5×3 m großes Betonbecken mit Schallabsorbern an den Wänden zur Unterdrückung von Vielfachreflexionen.

Der Testkörper bestand aus einem Aluminiumzylinder (Ø=100 mm, Länge=136 mm) mit in 6 Stufen einstellbarer Dichte von 1.03 bis 3.18 kg/dm^3 (siehe Abbildung 3). Dieser Testkörper wurde in einem ersten Aufbau mit unterschiedlichen Dichten an derselben Position mit Nylon-Fäden in etwa derselben Wassertiefe wie der Sender (ITC 4008) im Wasservolumen gehalten. In dieser Position wurden die Beschleunigungen des Körpers

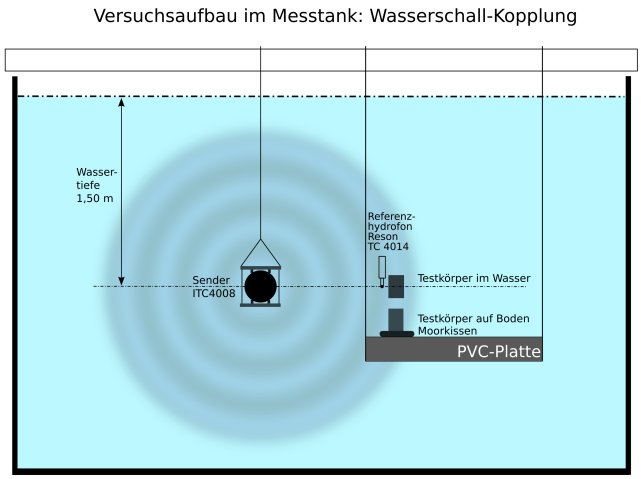

Abbildung 2: Versuchsaufbau: Sender in der Mitte des Wasservolumens zur Maximierung der freien Weglänge

dreidimensional bei verschiedenen gesendeten Signalen und Frequenzen erfasst. In einem zweiten Experimentaufbau wurde der Körper auf der PVC-Bodenplatte auf einem Moorkissen mit quasifluidem Sediment (Dichte ρ_b = 1.07 kg/dm^3) in verschiedenen Orientierungen (Lagen) abgelegt und die Beschleunigungsmessung wiederholt.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, waren der Sender und der Testkörper in einem Abstand von etwa 1.3 m in derselben Wassertiefe. Durch die tieffrequenten Signale hat sich im Tank ein stehendes Wellenfeld ausgebildet, das den abgehängten Testkörper zu erzwungenen Schwingungen anregte.

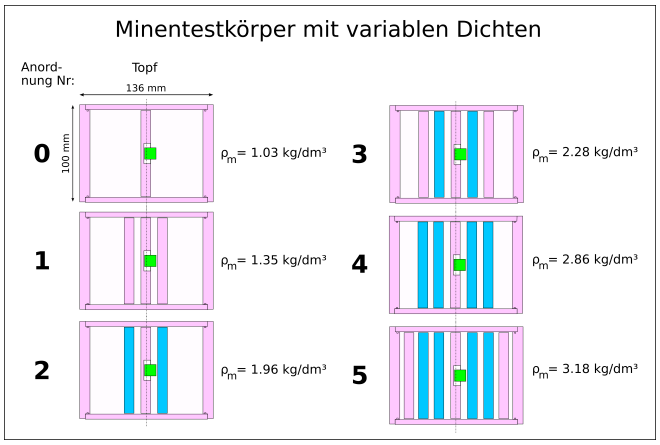

Abbildung 3: zylindrischer Messtopf (Ø=100 mm, L=136 mm) mit triaxialem Beschleunigungssensor in der Mitte (grün), Dichtenvariation durch Ballastscheiben (Ø=90 mm, d=10 mm) aus Aluminium (rosa) und Stahl (blau)

Als Sendesignale wurden ein linearer Frequenzsweep von 200 bis 2000 Hz mit 200 ms Länge und eine Folge von cw Pulsen mit 50 ms Länge bei den Frequenzen 200 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz und 2000 Hz verwendet. Die nachfolgende Auswertung der Signale ergab, dass die in der Körperumgebung entstehenden Interferenzen bei Frequenzen größer als 1000 Hz - je nach Lage des Messkörpers - kaum eine Gesetzmäßigkeit erkennen lassen. Im Folgenden wurden die cw-Signale bis 1000 Hz ausgewertet, um deren Fehler abschätzen und mit denen der 200 Hz-Linie vergleichen zu können. Aber auch bei der Frequenz 200 Hz ergeben sich großen Standardabweichungen der verschiedenen Messungen, so dass sich der prognostizierte Kurvenverlauf (in den Abbildungen 4 und 5 schwarz dargestellt) nicht mit Sicherheit bestätigen lässt. Dies liegt wahrscheinlich an der zu niedrigen Sendeamplitude des zu klein gewählten Sendewandlers (ungenügendes Signal/Rauschverhältnis). Daneben ist eine Kontrolle der tatsächlich im Medium auftretenden Schallschnelle im Vergleich zu der sich einstellenden Schnelle (Geschwindigkeit) des Testkörpers sinnvoll und könnte in einer Versuchswiederholung ebenfalls lokal erfasst und gegenübergestellt werden.

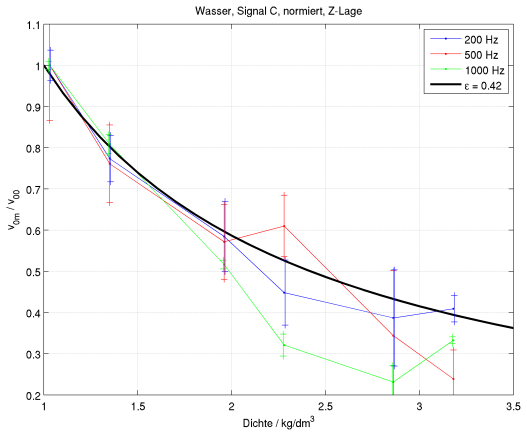

Abbildung 4: Relative Schnelleamplitude im freien Wasser als Funktion der Körperdichte bei den drei Messfrequenzen 200 Hz, 500 Hz und 1000 Hz mit der zum Form- und Lagefaktor (Lage Z) des Körpers passenden Geometriekurve nach Formel 1.

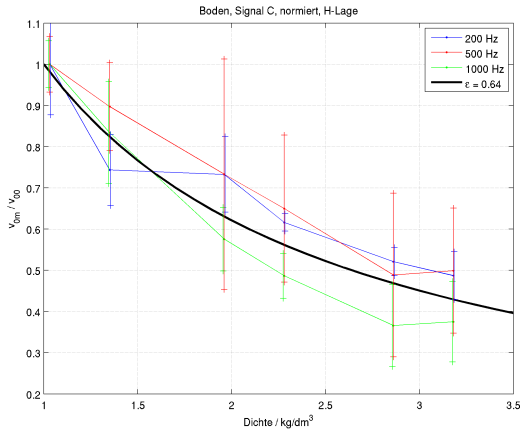

Abbildung 5: Relative Schnelleamplitude des auf dem Boden liegenden Körpers als Funktion der Körperdichte bei den drei Messfrequenzen 200 Hz, 500 Hz und 1000 Hz mit der zum Form- und Lagefaktor (Lage H) des Körpers passenden Geometriekurve nach Formel 2.

Zusammenfassung

Die Geschwindigkeit eines durch eine Schallwelle angeregten Testkörpers wurde über die Messung seiner Be-

schleunigung triaxial erfasst und durch Veränderung seiner mittleren Dichte ρ_m mittels Ballastscheiben variiert. Der von zwei neu aufgestellten Formeln zur Amplitudenminderung prognostizierte Verlauf der Amplitude wurde den experimentell ermittelten gegenübergestellt. Damit lässt sich zwar eine grundsätzliche Übereinstimmung mit dem Verlauf der relativen Schnelleänderungen erkennen, allerdings nur mit relativ großen systematischen Messfehlern des Aufbaus. Eine Wiederholung des Experiments mit anderem Sendewandler und einer Referenzschnellemessung erscheint bei niedrigeren Frequenzen sinnvoll.

Literatur

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

[2] Finn Jensen, William Kuperman, Michael Porter, Henrik Schmidt: Computational Ocean Acoustics, Springer, NewYork, 2000