

Ein neues Stehwellenrohr zur Messung akustischer Materialeigenschaften in Wasser

Edgar Schmidtke

Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik, Kiel; Email: edgar@schmidtke-netz.de

Einleitung

Zur Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft und anderen Gasen stellt die Verwendung eines Kundt'schen Rohres eine Standardmethode dar. Darüber hinaus ist sie geeignet, akustisch relevante mechanischen Eigenschaften einer in das Rohr eingebrachten Materialprobe zu bestimmen, sofern der Wellenwiderstand in der relativen Nähe des Widerstandes des umgebenden Mediums liegt. Im vorliegenden Fall soll ein Material im Hinblick auf seine Eignung als Wasserschallabsorber getestet werden, daher ist ein mit Wasser gefülltes Stehwellenrohr nötig. Ausgehend von dem in [3] vorgestellten Rohr und den in [1] genannten Kritikpunkten und Verbesserungsvorschlägen wurde ein neues Stehwellenrohr für den geplanten Frequenzbereich 1 kHz bis 10 kHz gebaut, das zwar wie seine Vorgänger aufrecht steht, der Sender befindet sich aber oben und die Probe unten (vgl. Abb. 1). Aufsteigende Luftblasen bleiben im Gegensatz zu den genannten früheren Rohren nicht mehr an der Probe hängen und machen die Messung nicht mehr unbrauchbar. Die Befestigung des Rohres und der Probe an dem Granitblock soll die nicht reproduzierbaren Effekte der Bildung von Spalten am Rohrende verhindern.

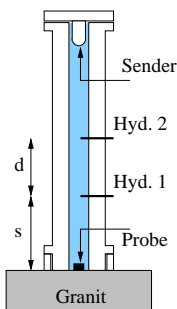


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Stehwellenrohres.

Die Übertragungsfunktion H wird als Quotient der beiden Wechseldruckamplituden an den Hydrofonen definiert:

$$H = \tilde{p}(\text{Hyd.2})/\tilde{p}(\text{Hyd.1}). \quad (1)$$

Der Reflexionsfaktor ergibt sich damit wie gewohnt [7] zu:

$$R = e^{i2ks} \frac{e^{ikd} - H}{H - e^{-ikd}}. \quad (2)$$

Messungen ohne Probe

Unterhalb von 2 kHz konnte der verwendete Sender keine für die Messung ausreichende Leistung in das Wasser abgeben, zwischen 3 kHz bis 4 kHz wurden die erste $\lambda/2$ -Resonanz des umgebenden Stahlrohres und die erste Eigenschwingung des als Rohrabschluss verwendeten Granitblocks beobachtet, daher konnten auswertbare Messungen nur oberhalb von 4 kHz durchgeführt werden. Oberhalb von 7,5 kHz sorgten mehrere geometrische Effekte für numerisch nicht stabil auswertbare Ergebnisse, sodass das Messfenster auf 4 kHz bis 7 kHz eingeschränkt werden musste. Zwei verschiedene Messungen am nur mit entgastem Wasser gefüllten Rohr zeigt Abbildung 2.

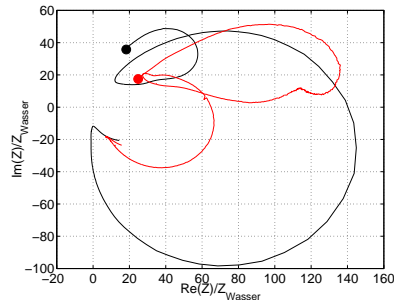


Abbildung 2: Zwei verschiedene Messungen der Eingangsimpedanz des Granitbodens im Frequenzbereich 4 kHz (gefüllte Kreise) bis 7 kHz.

Die Eingangsimpedanz des Bodens zeigt in beiden Fällen einen annähernd schallharten Verlauf, sodass der Granitboden im weiteren Verlauf als ideal schallhart angenommen wurde. Die Unterschiede zwischen den Messungen sind auf verschiedene starke mechanische Kopplungen zwischen Stahlrohr und Granitboden durch unterschiedliche Anzugsmomente der Verbindungsschrauben zurückzuführen.

Messungen mit Probe

Abbildung 3 zeigt den Vergleich zwischen den Übertragungsfunktionen je einer Messung ohne und einer Messung mit Probe. Die scharfen Minima und Maxima der Messung ohne Probe werden kleiner und breiter durch die gegenüber dem Granit verminderte Reflexion der Probe und sie liegen wegen der im Material gegenüber dem Wasser geringeren Schallgeschwindigkeit auch bei anderen Frequenzen. Hätte die Probe nur phasendrehende Eigenschaften, wären die Minima und Maxima genauso scharf ausgeprägt wie bei der Messung des leeren Rohres, womit gezeigt ist, dass die Probe tatsächlich Wasserschall absorbieren kann.

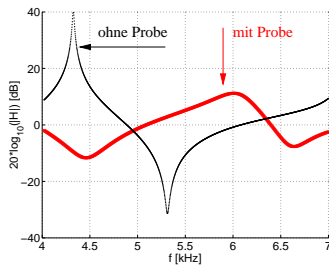


Abbildung 3: Vergleich der Übertragungsfunktionen je einer Messung mit und einer ohne Probe.

Φ sei der Anteil der Querschnittsfläche, den die nicht-querschnittsfüllende Probe bedeckt. Wenn h die Dicke der Probe ist, dann kann in einer ersten Näherung eine querschnittsfüllende Probe der Dicke $\Phi \cdot h$ angenommen werden. Unter den Annahmen, der Boden sei schallhart, die Dicke h der Probe sei klein gegen die Wellenlänge im Wasser und die Probe sei querschnittsfüllend, kann der Kompressionsmodul K aus dem Wellenwiderstand des Wassers $Z_0 = \rho c$ und dem gemessenen Reflexionsfaktor R berechnet werden zu:

$$K = 2\pi i h \Phi Z_0 f \cdot (1 + R)/(1 - R). \quad (3)$$

Bei schallhartem Abschluss ohne Probe kann man die Schallgeschwindigkeit im Wasser aus der Lage der Extrema der Übertragungsfunktionen bestimmen. Bei einer Messung mit Probe ist dies nicht mehr möglich. Daher wurde die Schallgeschwindigkeit einer freien ebenen Welle über die Kenntnis der Temperatur, des Salzgehaltes und der Tiefe nach [8] berechnet, die Verringerung der Schallgeschwindigkeit im Rohr ergibt sich dann nach [5]. Diese Berechnungen stimmen bei leerem Rohr hervorragend mit der über die Lage der Extrema bestimmten Schallgeschwindigkeit überein.

Vergleich mit DMTA-Messungen

Aus DMTA-Analysen am gleichen Material standen Messungen im Frequenzbereich 1 Hz bis 100 Hz und im Temperaturbereich von -116°C bis 70°C zur Verfügung. Die gemessenen Young'schen E-Moduln wurden mittels der WLF-Hyperbel [2] und einem an die Messdaten angepassten fraktionalen Materialmodell [4] auf den im Stehwellenrohr verwendeten Frequenzbereich und auf die bei der Messung herrschende Temperatur extrapoliert. Über den bekannten Blasengehalt des Materials konnte auf den Kompressionsmodul geschlossen werden. Abbildung 4 zeigt die Verläufe der aus den verschiedenen Messungen gewonnenen Kompressionsmoduln im Frequenzbereich zwischen 5 kHz und 6 kHz.

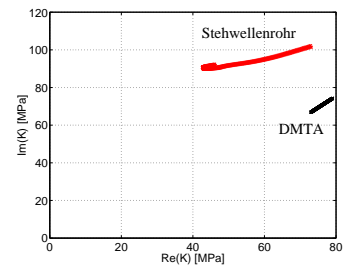


Abbildung 4: Vergleich der Kompressionsmoduln aus DMTA-Messung und der Messung im Stehwellenrohr.

Zum Einen liegen die Ergebnisse von DMTA-Messungen an vermeintlich gleichen Proben durchaus um 10% auseinander, zum Anderen wurden die bei der DMTA-Messung verwendeten Frequenzen um mehr als eine Größenordnung zu höheren Frequenzen extrapoliert. Außerdem wurde die Probenform als ideal angenommen. Vor diesem Hintergrund kann die Übereinstimmung der Daten aus den verschiedenen Messungen als gut betrachtet werden. Der sich im Wege der Auswertung ergebende Realteil der Schallgeschwindigkeit in der Probe liegt bei etwa nur 300 m/s, damit ist die gewählte Proben Dicke von 1 cm bei einigen kHz nicht mehr klein gegen die Wellenlänge im Wasser. Hier bedarf es einer genaueren Betrachtung der Messergebnisse von theoretischer Seite aus.

Zusammenfassung

Ausgehend von früher gebauten Stehwellenrohren zur Messung akustischer Materialeigenschaften in Wasser wurde ein neues Rohr gebaut, das die experimentellen Schwierigkeiten seiner Vorgänger umgeht. Dieses neue Rohr ist geeignet, reproduzierbar in einem eingeschränkten Frequenzbereich von 4 kHz bis 7 kHz Kompressionsmoduln von Materialproben zu bestimmen. Der erste Vergleich mit den Ergebnissen aus DMTA-Messungen zeigt gute Übereinstimmung, die sich durch eine die Geometrie der Probe besser berücksichtigende Theorie (wie z. B. [6]) sicher noch verbessern lässt.

Literatur

- [1] J. Ehrlich, Fortschritte der Akustik (2000) 682–683, DAGA 2000
- [2] J. D. Ferry, „Viscoelastic Properties of Polymers“, J. Wiley & Sons, New York (1980)
- [3] D. Guicking, K. Wicker und C. Eberius, Acta Acustica **88** (2002) 886–895
- [4] R. C. Koeller, J. App. Mech. **51** (1984) 299–307
- [5] D. I. Korteweg, Annalen der Physik **5** (1878) 525
- [6] W. Kuhl, H. Oberst und E. Skudrzyk, Acustica **3** (1953) 421–433
- [7] A. F. Seybert und D. F. Ross, J. Acoust. Soc. Am. **61** (1977) 1362–1370
- [8] R. J. Urick, „Principles of Underwater Sound“, McGraw-Hill, New York (1967)