

Quantitative Schallfeldmessungen mit refraktometrischer Tomographie in flüssigen und festen, transparenten Medien

Ludwig Bahr und Reinhard Lerch

Lehrstuhl für Sensorik, Universität Erlangen-Nürnberg, Deutschland, Email: bahr@lse.e-technik.uni-erlangen.de

Einleitung

Hydrophone sind heute die am weitesten verbreiteten Messinstrumente für Schalldruckmessungen in Wasser. Es existieren unterschiedliche Bauformen, die als Nadel- und Membranhydrophone bekannt sind. Stets basiert das Wandlerprinzip auf der Transformation der Oberflächenkraft auf das Sensorelement, gegeben durch das räumliche Mittel des Schalldrucks, in eine elektrische Spannung. Das Messinstrument wird in das Ausbreitungsmedium eingebracht und stört damit die Ausbreitung der Schallwellen.

Optische Schalldruckmessverfahren sind nicht nur rückwirkungsfrei, es kann darüberhinaus auch im Inneren von transparenten Festkörpern gemessen werden. Wir stellen ein optisches Verfahren vor, dessen Messprinzip die Abhängigkeit des Brechungsindizes (engl. refractive index) vom Druck ausnützt. Quantitative Messungen können mit Hilfe tomographischer Rekonstruktion durchgeführt werden. Aus diesem Grunde wollen wir das Verfahren refraktometrische Tomographie bzw. light refractive tomography nennen. Messergebnisse des Verfahrens in Wasser, die eine gute Übereinstimmung mit Hydrophonmessungen zeigten, wurden bereits vorgestellt [1]. Das Thema dieses Beitrages sind Schalldruckmessungen im Inneren eines Plexiglasblocks.

Messprinzip

Bei dem Messverfahren der refraktometrischen Tomographie wird der optische Weg L des Laserstrahls eines Interferometers, das ein Schallfeld durchstrahlt, ausgewertet. Der Laserstrahl wird dabei auf einen starren Reflektor fokussiert. Änderungen des optischen Weges entstehen nur durch den Schalldruck, da der Brechungsindex und damit verknüpft die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserlichts im Ausbreitungsmedium eine Funktion des absoluten Drucks sind. Der Gesamtdruck kann über einen Störungsansatz in einen Ruhe- und einen Wechselanteil aufgespalten werden. Letzterer entspricht dem Schalldruck p . Damit kann der Brechungsindex in der Form

$$n(x, y, z, t) = n_0 + \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_S p(x, y, z, t) \quad (1)$$

geschrieben werden. Mit $(\partial n / \partial p)_S$ wird der piezooptische Koeffizient bezeichnet. Der Index S weist auf adiabatische Zustandsänderungen hin, wie sie bei Schallausbreitung auftreten. Für eine fixe y - und eine fixe z -Koordinate erhält man für den optischen Weg in x -

Richtung

$$\begin{aligned} L(t) &= 2 \int_0^X n(x, t) dx, \\ &= L_0 + 2 \int_0^X \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_S p(x, t) dx \end{aligned} \quad (2)$$

mit $L_0 = 2n_0X$,

wobei X den Abstand vom Interferometer zum Reflektor angibt. Der in Gl. (2) gegebene Zusammenhang kann als Radon-Transformation der gesuchten Schalldruckverteilung angesehen werden. Für eine quantitative Analyse muss der Schalldruck demzufolge tomographisch aus den Interferometersignalen rekonstruiert werden. In unserem Messaufbau verwenden wir ein Laser Doppler Vibrometer (LDV), das von Linearverfahreinheiten bewegt das Schallfeld abscannt. Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau der realisierten Messanordnung, der die Orientierung von Interferometer zum Ultraschallwandler und dem Reflektor entnommen werden. Die tomographi-

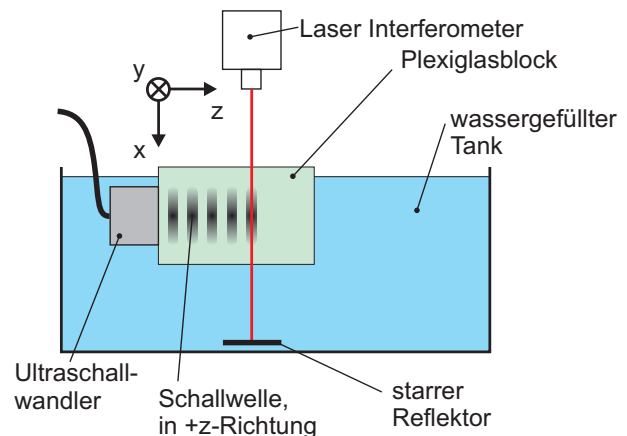


Abbildung 1: Anordnung zur Schalldruckmessung in einem Plexiglasblock. Der Ultraschallwandler sitzt auf dem Block bündig auf, der Laserstrahl des Interferometers (LDV) steht senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle.

sche Rekonstruktion der Daten findet an einem PC statt. Details zu den eingesetzten tomographischen Algorithmen und der Datennachbearbeitung finden sich in der genannten Publikation [1].

Mit einem kalibrierten Vibrometer lässt sich mit tomographischer Rekonstruktion nur dann auf den Schalldruck p quantitativ zurückschließen, wenn der Wert des piezooptischen Koeffizienten $(\partial n / \partial p)_S$ bekannt ist. Dieser lässt sich aus der Lorentz-Lorenz-Gleichung oder der Gladstone-Dale-Beziehung zusammen mit der Tait-Gleichung theoretisch bestimmen. Bei Flüssigkeiten stim-

men die so berechneten Werte mit Messungen im Rahmen der Messgenauigkeit überein [2]. Bei Festkörpern können größere Abweichungen auftreten. Für Plexiglas wurde von Waxler et al. [3] ein piezooptischer Koeffizient von $(\partial n / \partial p)_S = 26 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ gemessen. Dieser Wert wurde den im folgenden vorgestellten tomographischen Rekonstruktionen zugrunde gelegt.

Messergebnisse

Zur Untersuchung der Schallausbreitung wurde ein Plexiglasquader mit polierten Seitenflächen und der Dimension $50 \times 100 \times 200 \text{ mm}$ eingesetzt. Auf eine der Seitenflächen wurde jeweils ein Panametrics V302 Ultraschallwandler aufgesetzt. Er besitzt einen Schwingerdurchmesser von 25 mm und war nicht fokussierend mit ebenen Wandleroberfläche und mit einer Mittenfrequenz von 1 MHz ausgeführt.

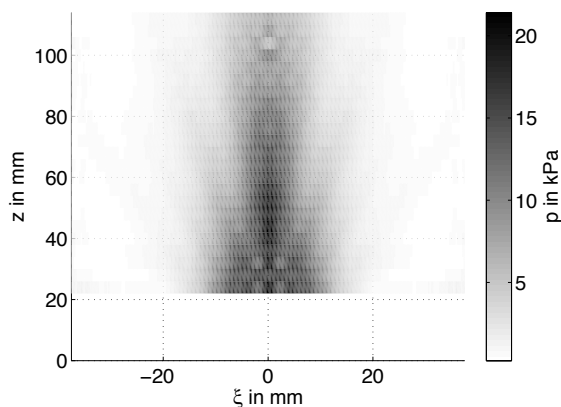


Abbildung 2: Schalldruckprofil im Plexiglasquader bei $V_{pp} = 9 \text{ V}$ Anregung.

Abb. 2 und 3 zeigen Schalldruckprofile bei einer Anregung von 1 MHz einmal bei Schallausbreitung in Plexiglas und einmal in Wasser. In Plexiglas wurden 25 Projektionen mit einer Schrittweite von $\Delta\xi = 0,25 \text{ mm}$ aufgezeichnet. Die Schallfeldrekonstruktion in Wasser setzt sich aus 50 Projektionen ebenfalls mit einer Schrittweite von $\Delta\xi = 0,25 \text{ mm}$ zusammen.

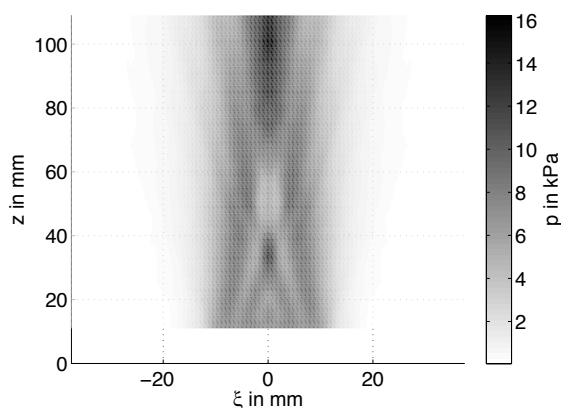


Abbildung 3: Schalldruckprofil in Wasser bei $V_{pp} = 9 \text{ V}$ Anregung.

Man findet nicht nur eine unterschiedliche Schalldruckamplitude im natürlichen Fokus von 22 kPa bei Plexiglas und 16 kPa in Wasser, sondern auch ein deutlich unterschiedliches Schalldruckprofil bedingt durch die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit von 2600 m/s in Plexiglas und 1480 m/s in Wasser.

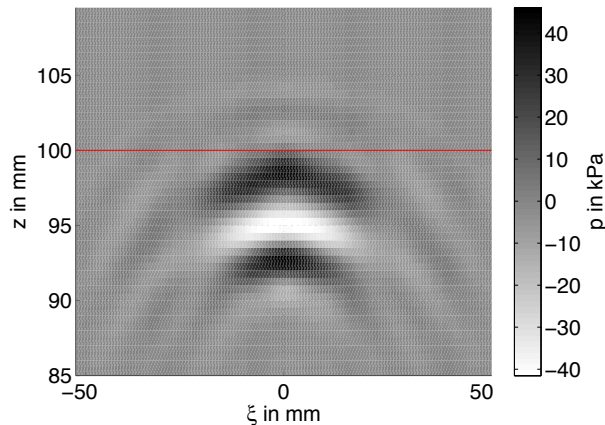


Abbildung 4: Schalldruckverteilung zum Zeitpunkt $t = 11,68 \mu\text{s}$ nach der Anregung mit einem Schallpuls. Dieser befindet sich gerade beim Übergang von Plexiglas ($z = 0 - 100 \text{ mm}$) in Wasser ($z > 100 \text{ mm}$). Die Grenzfläche ist durch eine Linie im Graphen hervorgehoben.

Transmission und Reflexion eines Schallpulses an der Plexiglas-Wasser-Grenzfläche wurde ebenfalls untersucht. Die Grenzfläche verlief in der xy -Ebene, so konnte für die Projektionen der xy -Ebene der jeweilige piezooptische Koeffizient von Plexiglas und Wasser in der tomographischen Rekonstruktion eingesetzt werden. Abb. 4 zeigt eine Momentaufnahme der Schalldruckverteilung zum Zeitpunkt $t = 11,68 \mu\text{s}$. Angeregt wurde hier mit einem 3 Perioden dauernden Sinuspuls mit einer Frequenz von 500 kHz. Es wurden 50 Projektionen mit einer Abtastung von $\Delta\xi = 0,75 \text{ mm}$ aufgenommen.

Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Verfahren der refraktometrischen Tomographie kann der Schalldruck quantitativ, orts- und zeitaufgelöst in transparenten Medien gemessen werden. Wird die Projektionsebene parallel zu einer Grenzfläche zwischen zwei transparenten Medien ausgerichtet, können die transmittierten und die reflektierten Anteile einer Schallwelle gemessen werden.

Literatur

- [1] L. Bahr und R. Lerch. Beam Profile Measurements Using Light Refractive Tomography. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 55(2):405-414, 2008.
- [2] W. A. Riley und W. R. Klein. Piezo-optic coefficients of liquids. J. Acoust. Soc. Am., 42(6):1258-1261, 1967.
- [3] R. M. Waxler, D. Horowitz und A. Feldman. Optical and physical parameters of Plexiglas 55 and Lexan. Applied Optics, 18(18):101-104, 1979.