

Rekonstruktion der räumlichen Schallwechseldruckverteilung unter Berücksichtigung der Orthogonalität optischer und akustischer Achsen beim Schlierenverfahren

Sergei Olfert¹, Leander Claes, Bernd Henning²

Universität Paderborn, 33098 Paderborn, E-Mail: ¹Olfert@emt.upb.de, ²Henning@emt.upb.de

Ansätze zur 3D-Schallwechseldruckerfassung

Es gibt unterschiedliche Verfahren zur räumlichen Erfassung der Schallwechseldruckverteilung in flüssigen Medien, um z.B. die Abstrahlcharakteristik eines Ultraschallwandlers zu bestimmen. Häufig werden hierfür u.a. Nadelhydrophone oder faseroptische Hydrophone eingesetzt. Eine alternative Methode stellt die Schlierentechnik dar. Diese liefert eine 2D-Abbildung der Schallwechseldruckverteilung. Zur Rekonstruktion der 3D-Information müssen viele Schlierenbilder bei verschiedenen Rotationswinkeln erfasst und verarbeitet werden. In dem hier vorgestellten neuen Ansatz werden der Ultraschallwandler in Richtung der optischen Achse geschwenkt und die winkelabhängige Abbildung der Ultraschall-Schliere ausgewertet.

Aufbau und Funktion des Schlierenmessplatzes

Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Schlierenmessplatzes. In Abhängigkeit von der lokalen Schallwechseldruckverteilung wird die ebene elektromagnetische Welle (EM-Welle) moduliert. Für geringen Schallwechseldruck stellt die Schliere bei Annahme der Raman-Nath-Beugung ein schwaches Phasenobjekt dar.

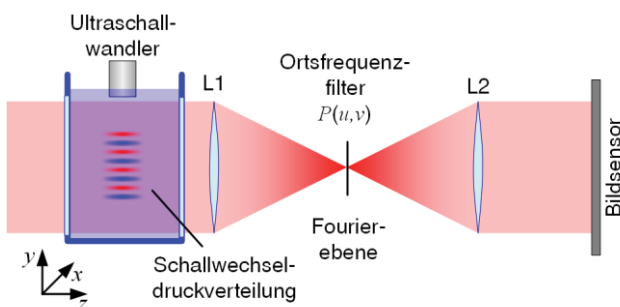


Abbildung 1: Aufbau des Schlierenmessplatzes

Die Phasenänderung $\Delta\phi$ der EM-Welle ist eine integrale Information der Schallwechseldruckverteilung entlang eines Pfades γ und lässt sich durch Gleichung 1 berechnen [1, 2].

$$\Delta\phi(x, y, z_d, \theta) = \frac{2\pi}{\lambda_{EM}} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right) \cdot \int_{\gamma} p(x, y, z, \theta) ds \quad (1)$$

Dabei sind λ_{EM} die Wellenlänge der EM-Welle, $\partial n / \partial p$ die piezooptische Konstante, γ der Integrationspfad, p der Schallwechseldruck, z_d das Ende des Bilanzraums und θ der Schwenkwinkel der Hauptabstrahlrichtung. Im Folgenden wird gezeigt, dass nur ein kleiner Winkelbereich der akustischen Welle, der nahezu orthogonal zur optischen Achse ausgerichtet ist, einen signifikanten Anteil zur Phasenänderung liefert.

Neuer Ansatz zur 3D-Rekonstruktion

Bei der klassischen Methode zur 3D-Rekonstruktion wird das Schallfeld um die akustische Achse (y-Achse) gedreht. Hier wird nun vorgeschlagen, das Schallfeld in der Sagittalebene (d. h. um die x-Achse) im Zentrum des Bilanzraums zu schwenken (siehe Abb. 2).

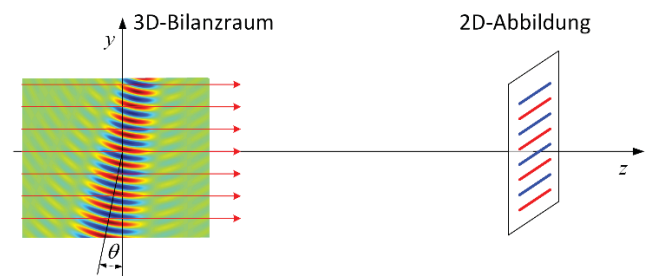


Abbildung 2: Neuer Ansatz zur Bestimmung der 3D-Schallwechseldruckverteilung

Zur weiteren Untersuchung werden die Schallwechseldruckverteilungen von idealen kreissymmetrischen Kolbenschwingern im Fernfeld mit definierten Divergenzwinkeln γ_0 angenommen [3]. Dann wird die integrale Phasenänderung der EM-Welle bei unterschiedlichen Schwenkwinkeln θ berechnet. Die maximalen Phasenänderungen für Schallwechseldruckverteilungen mit unterschiedlichen Divergenzwinkeln bezüglich der akustischen Achse sind in Abb. 3 dargestellt. Die Anteile der Schallwelle, die orthogonal zur optischen Achse ausgerichtet sind, beeinflussen die Phasenänderung am stärksten. Wenn der Schwenkwinkel θ gleich dem Divergenzwinkel γ_0 ist, zeigt sich erwartungsgemäß, dass sowohl der Schallwechseldruck als auch die Phasenänderung minimal werden. Auf diese Weise können durch das Schwenken des Ultraschallwandlers bzw. des Schallfeldes zusätzliche Information über die räumlichen Schallwechseldruckverteilungen gewonnen werden.

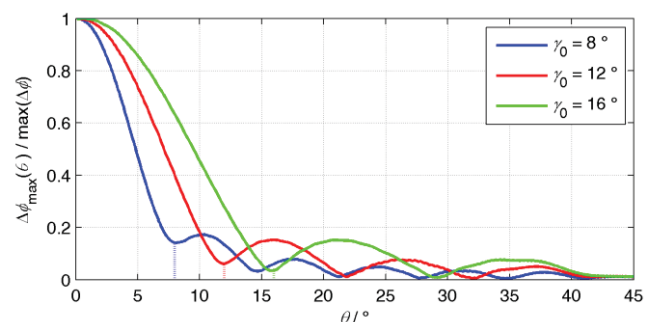


Abbildung 3: Relative maximale Phasenänderung für Schallwechseldruckverteilungen in Abhängigkeit vom Schwenkwinkel θ und Divergenzwinkeln γ_0

3D-Rekonstruktion durch gefilterte Rückprojektion

Die Radontransformation der Schallwechseldruckverteilung ist eine Integraltransformation, die proportional zur integralen Phasenänderung ist (Gleichung 2).

$$\text{Radon}\{p(x, y, z, \theta)\} \sim \Delta\varphi(x, y, z_d, \theta) \quad (2)$$

Bei vielen Ultraschallwandlern ist die resultierende Phasenänderung für Schwenkwinkel größer als $\pm 45^\circ$ vernachlässigbar klein. Somit kann der Schwenkwinkelbereich ohne Informationsverlust auf 90° halbiert werden. Die Rekonstruktion der 3D-Schallwechseldruckverteilung erfolgt mittels gefilterter Rückprojektion, wobei die Rotation der Schallwechseldruckverteilung um die x -Achse erfolgt. Folglich wird so die Phasenverschiebung für eine Spalte bei der Koordinate x_n ausgewertet und bestimmt. Das Ergebnis der gefilterten Rücktransformation ist die Schallwechseldruckverteilung in der Sagittalebene (Seitenansicht) der 3D-Schallwechseldruckverteilung bei der Koordinate x_n . Um die gesamte Schallwechseldruckverteilung zu rekonstruieren, wird das Vorgehen für alle x -Koordinaten der Abbildung angewandt.

Simulationsergebnisse für einen Rechteckschwinger

Für die Verifikation der 3D-Rekonstruktion wird eine 3D-Schallwechseldruckverteilung im Fernfeld eines Rechteckschwingers vorgegeben [3]. Es wird zunächst die resultierende 2D-Phasenänderung für verschiedene Schwenkwinkel von -45° bis $+45^\circ$ berechnet, was jeweils einer üblichen 2D-Schlierenabbildung entsprechen würde. Aus den einzelnen Abbildungen wird anschließend die 3D-Schallwechseldruckverteilung rekonstruiert bzw. berechnet.

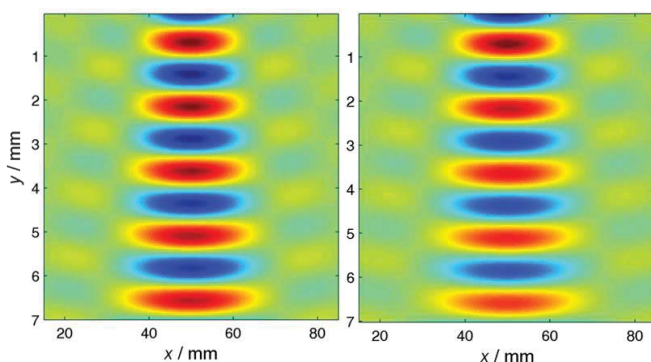


Abbildung 4: Frontalebene des Schallfeldes (entspricht der 2D-Schlierenabbildung; links) und rekonstruierte Schallwechseldruckverteilung (rechts) bei $\theta = 0^\circ$

In Abb. 4 sind die berechnete Schlierenabbildung und die Schallwechseldruckverteilung (in x - y -Ebene) aus dem rekonstruierten 3D-Bilanzraum beim Schwenkwinkel $\theta = 0^\circ$ gegenübergestellt. Die Schlierenabbildung suggeriert mit zunehmender y -Entfernung einen höheren Schallwechseldruck. Erklären lässt sich dies durch zwei Effekte, welche die Schlierenabbildung beeinflussen. Denn sowohl der lokale

Schallwechseldruck als auch die Tiefe des Schallfeldes (in z -Richtung) bestimmen die erfasste integrale Phasenänderung. Aufgrund der geometrischen Schallaufweitung vergrößert sich die Tiefe der ebenen Wellenanteile mit zunehmender y -Entfernung. Die Dämpfung der Schallwelle im Medium wird vernachlässigt.

Ein Vergleich der vorgegebenen Schallwechseldruckverteilung in der Sagittalebene (y - z -Ebene) und der rekonstruierten Schallwechseldruckverteilung zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung (Abb. 5).

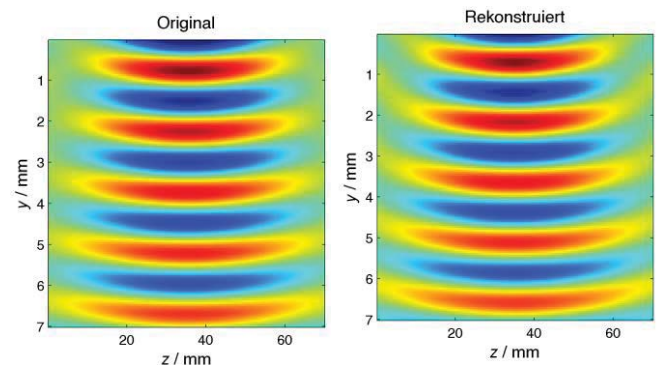


Abbildung 5: Sagittalebene (Seitenansicht) der vorgegebenen (links) und der rekonstruierten (rechts) Schallwechseldruckverteilung

Zusammenfassung und Ausblick

Akustische Wellen, deren Wellennormale von der Orthogonalen zur optischen Achse abweichen, werden beim Schlierenverfahren kaum erfasst bzw. verursachen nur geringe bis vernachlässigbare Phasenänderungen in der Schlierenabbildung.

Diese Tatsache ausnutzend, kann die Aufnahme der 3D-Schallwechseldruckverteilung auf den Winkelbereich von 90° (180° beim klassischen 3D-Rekonstruktionsverfahren) reduziert werden, um das Schallfeld dennoch vollständig zu rekonstruieren.

Im Folgenden gilt es die hier vorgestellten theoretischen Betrachtungen experimentell zu verifizieren. Zusätzlich ist ein Vergleich mit der klassischen Methode sinnvoll, um die Qualität der Rekonstruktion zu bewerten.

Literatur

- [1] Cook, B., Cavanagh, E., Dardy, H., A Numerical Procedure for Calculating the Integrated Acoustooptic Effect, *Sonics and Ultrasonics*, IEEE Transactions, vol. 27, no. 4, pp. 202–207, 1980.
- [2] Nagedra Nath, N., Raman, C., The diffraction of light by sound waves of high frequency - Part II, *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-A*, no. 2, pp. 413–420, 1936.
- [3] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H., *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, 5th ed. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1986.