

Vergleich zwischen der Schlierenmethode nach Toepler und der Hintergrundschlierenmethode zur Bestimmung akustischer Größen eines Ultraschallwandlers

Sergei Olfert¹, Bernd Henning²

Universität Paderborn, EIM-E, Elektrische Messtechnik, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, E-Mail:

¹Olfert@emt.upb.de; ²Henning@emt.upb.de

Einleitung

Es gibt unterschiedliche Methoden, um räumliche Schallwechseldruckverteilungen in Flüssigkeiten zu erfassen. Viele dieser Verfahren haben zwei Nachteile. Sie sind zum einen invasiv, beeinflussen somit die sich ausbreitende Ultraschallwelle, und zum anderen sehr zeitaufwendig. Die Visualisierung von Ultraschallfeldern mittels Schlierenmethode ist eine schnelle und einfache Methode, um zweidimensionale Schallfelder nichtinvasiv zu analysieren. Ein besonderer Vorteil besteht darin, dass man unmittelbar resultierende Veränderungen im Schallfeld zum Beispiel bei Frequenzänderung, Sensorausrichtung... beobachten kann. In diesem Beitrag werden zwei dieser Verfahren vorgestellt. Die modifizierte Schlierenmethode nach Toepler, das im Weiteren als modifizierte Schlierenmethode bezeichnet wird, und die Hintergrundschlierenmethode, das sich bisher hauptsächlich zur Strömungsvisualisierung etabliert hat [1]. Im ersten Teil werden beide Messverfahren erläutert, die realisierten Messaufbauten sowie Einsatzmöglichkeiten für die Schallfeldcharakterisierung kurz vorgestellt. Im zweiten Teil werden beide Verfahren verglichen und die Vor- und Nachteile bezüglich ausgewählter Messaufgaben bewertet.

Modifizierte Schlierenmethode nach Toepler

Bei der Schlierentechnik wird die Dichteabhängigkeit des Brechungsindex in einem Medium ausgenutzt. Der Zusammenhang zwischen der durch eine Ultraschallwelle verursachten lokalen Wechseldruck bzw. der Wechseldichte und dem Brechungsindex wird über die Lorentz-Lorenz-Gleichung beschrieben. Hierbei wird vorausgesetzt, dass eine Schliere, die auch als Phasenobjekt bezeichnet wird, durch eine ebene, monochromatische elektromagnetische Welle bestrahlt wird. Bei der Transmission durch ein Phasenobjekt wird die Phase der ebenen elektromagnetischen Welle moduliert (Abbildung 1). Die modulierte Welle wird durch eine hinter der Schliere angebrachten Linse in der Brennebene, die gleichzeitig die Fourierebene bildet, fokussiert. Bei der mathematischen Beschreibung wird die Ausbreitung der phasenmodulierten Lichtwelle mit Hilfe der Fresnelnäherung beschrieben. Die Annahme einer ebenen Welle vor dem Phasenobjekt führt dazu, dass in der Brennebene der darauffolgenden Linse die zweidimensionale Fouriertransformierte des Phasenobjekts mit der Grundhelligkeit abgebildet wird (Gleichung 1). Dabei stellt $f(x,y)$ die Eingangsfunktion, also das durchleuchtete Schallwellenpaket, $h(u,v)$ die Filterfunktion in

der Fourierebene und $g(x',y')$ die gefilterte Abbildung der Eingangsfunktion dar.

$$g(x',y') \sim \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} \{ f(x,y) \} \cdot h(u,v) \} \quad (1)$$

Um nur die Schliere ohne die Grundhelligkeit auf einem Sensor abzubilden, wird ein optisches Filter verwendet, das bestimmte Ortsfrequenzen in der Fourierebene herausfiltert. Im realisierten Aufbau dient ein DLP-Spiegelarray als optisches Amplitudenfilter [2].

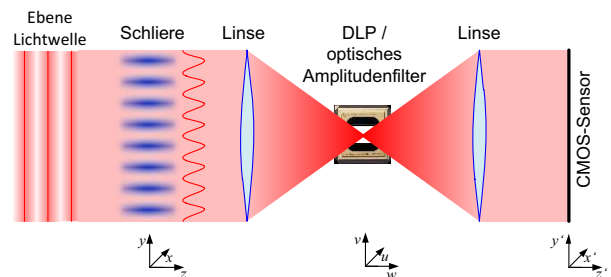


Abbildung 1: Funktionsprinzip der modifizierten Schlierenmethode nach Toepler

Hintergrundschlierenmethode

Die Hintergrundschlierenmethode zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau aus, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Linse bildet das stochastische Muster des im Hintergrund befindlichen Schirms auf dem CMOS-Sensor scharf ab.

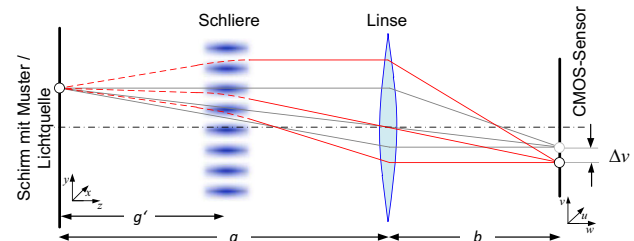


Abbildung 2: Aufbau und Funktionsweise der Hintergrundschlierenmethode

Im ersten Schritt wird ein Referenzbild des Hintergrundmusters ohne Einfluss einer Schliere erstellt. Im zweiten Schritt wird zwischen dem Schirm und der Objektivlinse das zu untersuchende Phasenobjekt eingebracht. Dies führt dazu, dass die Lichtstrahlen durch dieses Phasenobjekt abgelenkt werden. Die Abbildung eines Punktes des Hintergrundmusters wird durch die Schliere auf der Sensoroberfläche mit der Verschiebung Δv abgebildet. Diese Verschiebung ist von der Größe des Gradienten abhängig. Mit Hilfe der Korrelation zwischen dem Referenzmuster und dem durch die Schliere verzerrten Muster ist es möglich, auf die Größe des Brechungsindexgradienten zu schließen. Der Vektor

zwischen dem Ursprungspunkt und dem Maximum der zweidimensionalen Korrelationsfunktion gibt den Betrag und die Richtung der Dichteänderung an.

Für die experimentelle Untersuchung mit Ultraschall wurde ein senkrecht zur Schallausbreitung dargestelltes Linienmuster als Hintergrund verwendet (siehe Abbildung 3).

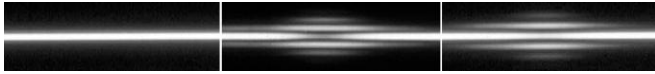


Abbildung 3: Ausschnitte aus dem Referenzbild (links) und den durch Ultraschall verzerrten Bildern bei einer Anregungsfrequenz von 0,8 MHz (mitte) und 1,1 MHz (rechts)

Die Untersuchung zeigte nicht die erwartete amplitudenabhängige lokale Verzerrung der Linien und lässt sich nicht, wie in [1] beschrieben mit dem strahlenoptischen Ansatz unter der Annahme des lokal begrenzten linearen Anstiegs des Brechungsindex, erklären. Stattdessen zeigte sich ein frequenzabhängiger Zusammenhang. Zur mathematischen Beschreibung dieses Phänomens wird die Interferenz mit Licht aus einer ausgedehnten Lichtquelle berücksichtigt [3]. Mit dieser Annahme kann die Abbildung durch das optische System aus Abbildung 2 nach Gleichung 2 beschrieben werden [4].

$$I(u, v) = \frac{1}{\lambda M g'} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j \frac{k}{Mg'} (ux + vy)} dx dy \right|^2 \quad (2)$$

Die Intensität I in der Abbildungsebene entspricht dabei der Fouriertransformierten des Bilanzraums, wobei der Abbildungsmaßstab M sowie der Abstand zwischen dem Hintergrundmuster und der Schliere g' zu berücksichtigen sind. λ ist die mittlere Wellenlänge des einfallenden Lichts.

Bewertung beider Verfahren

Beide Verfahren sind zur Visualisierung von Schallfeldern im kontinuierlichen Betrieb geeignet. Bei der modifizierten Schlierenmethode sind hochwertige optische Komponenten notwendig, die exakt ausgerichtet werden müssen. Insbesondere die präzise Positionierung des Filters in der Fourierebene ist für die Abbildungsqualität der Schliere von essentieller Bedeutung. Die Hintergrundschlierenmethode hat den Vorteil eines einfachen *Aufbaus*. Nur wenige Komponenten sind für die Realisierung notwendig.

Ein weiterer Nachteil der modifizierten Schlierenmethode besteht darin, dass der Aufbau auf einen zuvor festgelegten *Frequenzbereich* dimensioniert wird. Schallwechseldrücke, die diesen Frequenzbereich über- oder unterschreiten, werden nur noch verfälscht dargestellt. Die Hintergrundschlierenmethode hat zwar ebenfalls diese Einschränkung, aber infolge der einfachen Justage ist eine Modifikation deutlich einfacher zu bewerkstelligen.

Ein Vorteil der modifizierten Schlierenmethode liegt darin, dass die Schallwellen unmittelbar auf einem Monitor dargestellt werden, wodurch unmittelbar die resultierenden Auswirkungen auf das Schallfeld zum Beispiel bei Änderung der Sendefrequenz oder Sensorausrichtung u.a. analysiert werden können. Bei der Hintergrundschlierenmethode ist für die *Visualisierung* der Schallwelle noch eine nachträgliche Verarbeitung des Referenzbildes und des durch die Schliere verzerrten Bildes notwendig.

Die Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der modifizierten Schlierenmethode und der Hintergrundschlierenmethode. Aus der Darstellung lassen sich die Symmetrie des abgestrahlten Schallfeldes und der Divergenzwinkel bestimmen. Der Kreis in der Abbildung 4 (rechts) stellt zum Vergleich den deutlich kleineren *Bilanzraum* der modifizierten Schlierenmethode dar. Mit beiden Verfahren ist es möglich, z. B. eine auftretende Asymmetrie des Schallfeldes zu bewerten, womit sich auch Rückschlüsse auf Defekte im Aufbau des Ultraschallwandlers ziehen lassen. Aufgrund des größeren Bilanzraumes ist die Hintergrundschlierenmethode für die Bestimmung des Divergenzwinkels besser geeignet.

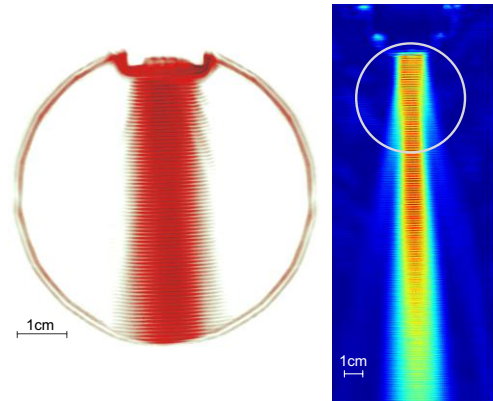


Abbildung 4: Ergebnisse der Schallfeldvisualisierung mittels modifizierter Schlierenmethode (links) und Hintergrundschlierenmethode (rechts) eines Ultraschallwandlers

Ein weiterer Vorteil der modifizierten Schlierenmethode ist die Analyse *transienter Ultraschallfelder* nach dem Stroboskopprinzip. Auf diese Weise lassen sich sowohl die Ausbreitung der Schallwelle im Medium als auch die Interaktion der Schallwelle mit Konstruktionselementen innerhalb der Messkammer (Gehäuse, Spiegel...) visualisieren. Auch bei der Hintergrundschlierenmethode ist dies möglich, erfordert jedoch deutlich höhere Belichtungszeiten auf dem CMOS-Sensor, was jedoch aufgrund des Sensorrauschens den Signal-Rauschabstand verringert.

Mit beiden Methoden wird eine 2D-Abbildung der Schliere gewonnen. Durch Rotation des Ultraschallfeldes lässt sich bei beiden Methoden das Schallfeld in eine *3D-Darstellung* umrechnen.

Literatur

- [1] Goldhahn, E.: Weiterentwicklung der Hintergrundschlierenmethode zu einem quantitativen Verfahren der Vermessung von Dichtefeldern. Universität Hannover, Dissertation, 2009
- [2] Unverzagt, C.; Olfert, S.; Henning, B.: A new method of spatial filtering for Schlieren visualization of ultrasound wave fields, ICU, 2009
- [3] Saleh, B. E. A.; Teich, M. C.: Grundlagen der Photonik. WILEY-VCH Verlag; 2008
- [4] Goodman, J. W.: Introduction to Fourier Optics, 3. Aufl. Englewood: Roberts & Company, 2005