

# Interferometrisches Messsystem zur Visualisierung von Ultraschallfeldern

Regina Schuster\*, Jan Helge Dörsam\*\*, Sören Soenneken\*\*, Yannick Schrödel\*\*\*, \*\*\*\*, \*\*\*\*\*<sup>†</sup>, Christoph M. Heyl\*\*\*, \*\*\*\*, \*\*\*\*\*<sup>†</sup>, Mario Kupnik\*\* und Anne Harth\*

\*Zentrum für Optische Technologien, Aalen School of Applied Photonics, Hochschule Aalen, Aalen

\*\*Fachgebiet Mess- und Sensortechnik, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt

\*\*\*Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg

\*\*\*\*Helmholtz-Institut Jena, Jena

\*\*\*\*\*GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt

mailto: regina.schuster@hs-aalen.de

Wir stellen ein bildgebendes Messsystem für die Charakterisierung von Ultraschallfeldern vor, das eine vielversprechende Alternative zu klassischen Methoden darstellt. Das System basiert auf einem Interferometer, das eine schnelle ( $t \ll 1$  s), zweidimensionale Visualisierung der Schalldruckverteilung eines Ultraschallfelds ermöglicht. Unsere Methode nutzt den Effekt, dass die von Ultraschallwellen induzierte Modulation des Luftdrucks den Brechungsindex der Luft ändert. Dadurch lassen sich diverse Ultraschallfelder interferometrisch visualisieren.

## 1 Motivation

Die beugungsbasierte Ablenkung eines Laserstrahls an einem Ultraschallfeld in Luft konnte bereits gezeigt werden [1]. Dies erfordert individuell gefertigte Hochleistungsultraschallwandler [2], deren berührungslose Charakterisierung nötig ist.

Die Charakterisierung solcher Schallfelder erfolgt typischerweise punktuell und akustisch, wobei ein Mikrofon (Größenordnung: ca.  $1 \text{ mm}^2$ ) direkt in das Schallfeld eingebracht wird. Das Mikrofon kann das Signal stören und das Messergebnis verfälschen. Problematisch sind v. a. auch die hohen Schalldrücke ( $SPL > 140$  dB), denn hierfür sind Mikrofone oft nicht spezifiziert. Besser wäre eine berührungslose Methode zur vollständigen Visualisierung der Ultraschallwellen in Echtzeit. Eine häufig genutzte Methode ist die sogenannte Schlierenfotografie. Damit lassen sich schallinduzierte Brechungsindexgradienten mit nur wenigen Komponenten (Lichtquelle, Spiegel, Apertur und Kamera) sichtbar machen. Die Schlierenfotografie ist jedoch abhängig von der Art und Ausrichtung der Apertur und außerdem handelt es sich dabei meist um eine rein visuelle 2D-Darstellung und nicht um quantitative Ergebnisse. [3]

Mit interferometrischen Methoden können berührungslos optische Weglängendifferenzen (OPD) gemessen werden. Sofern die Interaktionslänge bekannt ist, lassen sich damit quantitative Ergebnisse erzielen. Daher ergibt sich folgende Forschungsfrage: Ist es möglich, Ultraschallfelder interferometrisch zu vermessen?

Im Folgenden wird eine Methode präsentiert, die auf einem Fizeau-Interferometer basiert. Diese ermöglicht eine kontaktlose, zweidimensionale Visualisie-

rung von Ultraschallfeldern in Echtzeit ( $t \ll 1$  s) und liefert gleichzeitig mehr Informationen, als die Schlierenfotografie (z. B. quantitative Daten und die richtungsunabhängige Detektion von Druckänderungen).

## 2 Methoden

Das hier zu vermessende Schallfeld entspricht einer stehenden Schallwelle, die zwischen Ultraschallquelle und Reflektor zeitlich oszilliert. Die Schallquelle ist ein individuell gefertigtes Ultraschallarray [2]. Es besteht aus 64 piezoelektrischen Wandlern, die individuell und in Phase ansteuerbar sind. Dadurch können unterschiedlichste Schallfelder erzeugt werden. Das Ultraschallarray hat eine Schallfrequenz von  $f_s = 40$  kHz und erreicht einen Schalldruckpegel von  $SPL \approx 136$  dB in einer Entfernung von 0.3 m. [2]

Um den resultierenden Schalldruck zu erhöhen, wird ein Reflektor in einer Entfernung von

$$L = k \cdot \frac{\lambda_s}{2} = 69 \text{ mm}$$

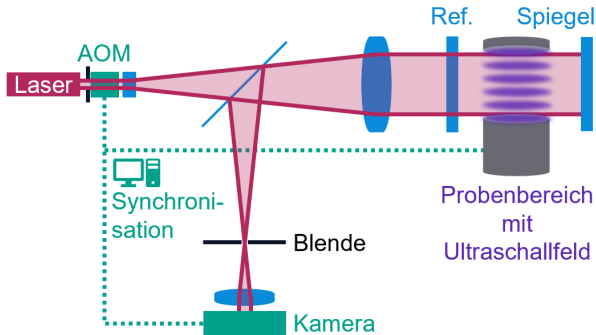
platziert, wobei  $\lambda_s$  die Schallwellenlänge und  $k$  eine natürliche Zahl ist.

Die Schalldruckverteilung  $p(x, t)$  einer stehenden Welle ergibt sich gemäß folgender Gleichung [4]:

$$p(x, t) = 2p_0 \cdot \cos\left(2\pi f_s \cdot \frac{x}{c_s}\right) \cdot \cos(2\pi f_s \cdot t)$$

Für den experimentellen Aufbau wird ein adaptiertes Fizeau-Interferometer von Zeiss verwendet (siehe Abb. 1). Eine Brechungsindexänderung der Luft im Probenbereich, z. B. aufgrund eines Schallfeldes, moduliert den Probenstrahl. Dadurch ergibt sich eine OPD zwischen dem Referenz- und dem Probenstrahl. Durch die Überlagerung beider Wellenfron-

ten kommt es am Detektor zur Interferenz. Aus diesen Interferogrammen lässt sich die OPD bestimmen und darstellen. Dafür hat das verwendete Interferometer *Zeiss DIRECT 100 NT* eine entsprechende Auswertesoftware, die auf der „Spatial Carrier Frequency Analysis“ basiert. [5, S. 107ff]

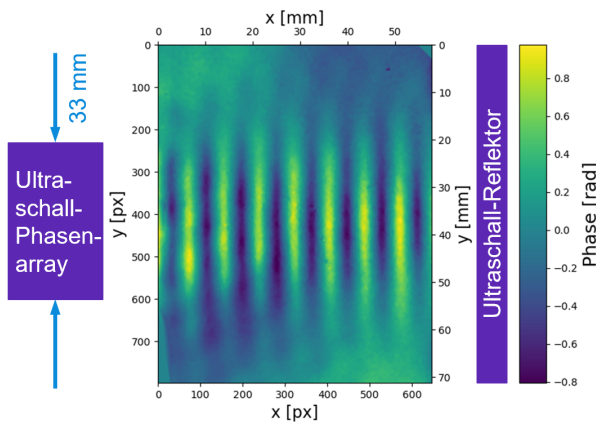


**Abbildung 1** Schematische Darstellung des Fizeau-Interferometers zur Visualisierung von Ultraschallfeldern. Gemäß der Darstellung [5, S. 54] wurde der Aufbau für die Messung von Ultraschallfeldern dahingehend angepasst, dass eine Synchronisation zwischen dem Fizeau-Interferometer und der Schallquelle implementiert wurde.

Die zeitliche Änderung des Brechungsindex durch die Oszillation der Schallwellen erfordert eine Synchronisation zwischen dem Ultraschallfeld und der Lichtquelle des Interferometers. Die CW-Lichtquelle (Helium-Neon-Laser; Wellenlänge  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) wird daher mithilfe eines akusto-optischen Modulators (AOM) extern gepulst.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

In dieser Arbeit wird das Fizeau-Interferometer *Zeiss DIRECT 100 NT* verwendet, um das stehende Ultraschallfeld eines Ultraschallarrays mit Reflektor zu visualisieren.



**Abbildung 2** Visualisierte Messdaten eines Ultraschallfelds, die mit dem Fizeau-Interferometer aufgenommen wurden. Schematisch sind die Ultraschallquelle (links) und der Reflektor (rechts) eingezeichnet.

Die OPD-Messdaten dieses Schallfeldes können in der Software des Interferometers in Echtzeit ( $t \ll 1 \text{ s}$ ) angezeigt werden. In Abb. 2 ist die durch den Schall verursachte OPD zwischen Referenz- und Probenstrahl als Phase dargestellt. Die Daten zeigen eine kosinusförmige Schallfeldverteilung entlang der  $x$ -Richtung und ebene Schallwellenfronten in  $y$ -Richtung.

Die Auswertung der Daten bezüglich der Schallfrequenz mittels Fourier-Transformation führt zu einem Ergebnis von  $f_s = 40.4 \text{ kHz} \pm 0.8 \text{ kHz}$ .

Um Temperaturänderungen und andere Störungen zu minimieren, wurde der Hintergrund (ohne Schallfeld) zuvor von den Rohdaten abgezogen.

Da die OPD gegenüber einer planen Referenz berechnet wird, ist die Visualisierung mit dieser Methode im Gegensatz zum Schlierenaufbau unabhängig von der Richtung der Brechungsindexänderung. Änderungen sind in  $x$ - und  $y$ -Richtung detektierbar.

### 4 Fazit

Diese Arbeit zeigt, dass die kontaktlose Visualisierungsmethode mittels Fizeau-Interferometer für stehende Ultraschallwellen funktioniert. Die zweidimensionalen Einzelaufnahmen des Schallfelds können direkt und in Echtzeit in der zugehörigen Software angezeigt werden. Diese interferometrische Methode eignet sich, ebenso wie der Schlierenaufbau, zur Visualisierung von Schallfeldern und zur Analyse der Schallfrequenz. Sie hat allerdings den Vorteil, dass das Schallfeld richtungsunabhängig in den Probenbereich eingebracht werden kann. Darüber hinaus bietet diese Visualisierungsmethode das Potenzial, zukünftig auch quantitative Werte bzgl. des Schalldrucks zu liefern.

Zukünftig soll der Aufbau genutzt werden, um diverse Schallfelder zu visualisieren, die mit dem Ultraschallarray erzeugt werden können. Es besteht außerdem die Möglichkeit, das Schallfeld auch während der schallinduzierten Laserstrahl-Ablenkung [1] mit dem Fizeau-Interferometer zu beobachten.

### Referenzen

- [1] Y. Schrödel and C. H. et. al., "Acousto-optic modulation of gigawatt-scale laser pulses in ambient air," *Nature Photonics*, 18 pp. 54–59 (2024).
- [2] A. Jäger and D. G. et. al., "Air-coupled 40-kHz ultrasonic 2D-phased array based on a 3D-printed waveguide structure," *IEEE International Ultrasonics Symposium* pp. 1–4 (2017).
- [3] A. Crockett and W. Rueckner, "Visualizing sound waves with schlieren optics," *American Journal of Physics*, 86 pp. 870–876 (2018).
- [4] M. Möser, *Technische Akustik* (Springer Vieweg, 2015).
- [5] B. Dörband, H. Müller, and H. Gross, *Handbook of Optical Systems* (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012).