

Visuelle Darstellung von Schallfeldern

Stefan Lindner, Lothar Zipser

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Fachbereich Elektrotechnik, PF 120701, 01008 Dresden

1 Einleitung

Visuelle Darstellungen von Luftschallfeldern erfolgen meist auf der Basis numerischer Simulationsrechnungen. Die hochaufgelöste, bildliche Darstellung gemessener Schalldruckverteilungen ist hingegen ein bisher nur unzureichend gelöstes Problem.

Konventionell kann die Messung und visuelle Darstellung von Schallfeldern mit bewegten Mikrofonen oder Mikrofonarrays [1] oder durch interferometrische Abtastung dünner Folien im Schallfeld [2] erfolgen. Diese Verfahren sind nicht rückwirkungsfrei und erreichen nur eine begrenzte örtliche Auflösung. Mit holographischen oder Laser-Speckel-Verfahren auf der Basis modifizierter Interferometer sind Druck- und Phasenverteilungen von Luftschallwellen rückwirkungsfrei erfassbar [3]. Diese modernen Verfahren erfordern jedoch einen hohen Geräteaufwand, hohe Schallintensitäten und erreichen trotzdem nur eine begrenzte Auflösung.

Hier wird ein Verfahren vorgestellt, dass auf der Basis handelsüblicher Laser-Doppler-Interferometer sehr anschauliche und hochauflösende Darstellungen von Luftschallfeldern ermöglicht.

2 Messprinzip

Bild 1 zeigt das Messprinzip. Der Strahl eines Laser-Doppler-Interferometers wird durch das zu untersuchende Schallfeld geleitet und an einem starren Reflektor reflektiert.

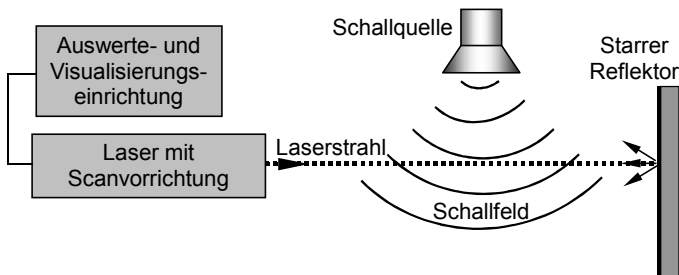


Bild 1: Messverfahren zur Schallfeld-Visualisierung

Die Lichtgeschwindigkeit c in einem Medium wie Luft hängt gegenüber der Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum von der Brechzahl n des Mediums ab.

$$c = \frac{c_0}{n}$$

Die Brechzahl der Luft n ist wiederum eine Funktion des Luftdrucks p , der Temperatur T und des Wasserdampf-Partialdrucks w , die mit guter Näherung durch folgende Formel ausgedrückt werden kann [4], [5]:

$$n \approx 1 + \frac{n_0 - 1}{1 + \alpha \cdot T} \cdot \frac{p}{p_0} - \frac{4,13 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1} \cdot w}{1 + \alpha \cdot T}$$

Dabei ist $\alpha = 3,67 \cdot 10^{-3} / \text{K}$ der thermische Ausdehnungskoeffizient der Luft und n_0 die Brechzahl bei 0°C , dem Bezugsdruck p_0 und der Wellenlänge des Lichtes. Ist dem Luftdruck p_0 ein Wechsellldruck $p(t)$ überlagert, so ändern sich auch Brechzahl und Lichtgeschwindigkeit proportional dazu. Bei konstanter Feuchte und unter Vernachlässigung eines adiabatischen Temperatureinflusses ist für den im Experiment verwen-

deten Helium-Neon-Laser mit 633 nm Wellenlänge bei einem Luftdruck von $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

$$n(t) \approx 1 + 2,72 \cdot 10^{-9} p(t) \cdot \text{Pa}^{-1}.$$

Ein Schallwechseldruck $p(t)$ bewirkt so eine, wenn auch sehr kleine, periodische Änderung der Brechzahl und damit der Lichtgeschwindigkeit, die ein Laser-Doppler-Vibrometer als scheinbare Schwingschnelle $v(t)$ bzw. Schwingweg $\xi(t)$ des Reflektors erfasst. Daraus lässt sich der über die Strecke des Lichtstrahls gemittelte Schalldruck $p(t)$ nach Betrag und Phase ermitteln und nach synchronisierter flächenhafter Abtastung des Schallfeldes als Schallpegelfeld oder als animiertes Wellenfeld darstellen.

Bei einem Schallpegel von 100 dB und einer doppelt durchlaufenen Messstrecke von 10 cm würde ein scheinbarer Schwingweg $\xi(t)$ von etwa 1 nm gemessen. Moderne Doppler-Vibrometer können – in Abhängigkeit von der jeweiligen Bandbreite, Frequenz, Mittelung usw. – Schwingwege bis ca. 1 pm auflösen, so dass auch im Hörbereich ein ausreichender Signal-Rauschabstand zur Verfügung steht.

Bei Schallfelduntersuchungen, bei denen die räumliche Mittelung des Drucks über die Länge des Lichtstrahls stört, könnten prinzipiell tomographische Auswerteverfahren eingesetzt werden, wie das bei den erwähnten Laser-Speckel-Verfahren bereits praktiziert wurde.

3 Messbeispiele

Anhand ausgewählter Beispiele soll die Leistungsfähigkeit des Messprinzips demonstriert werden. Prinzipiell können die Schallfelder farbige mit hoher Auflösung sowie als Animationen dargestellt werden, die direkt die Wellenausbreitung zeigen.

3.1 Schallfeld eines Lautsprechers

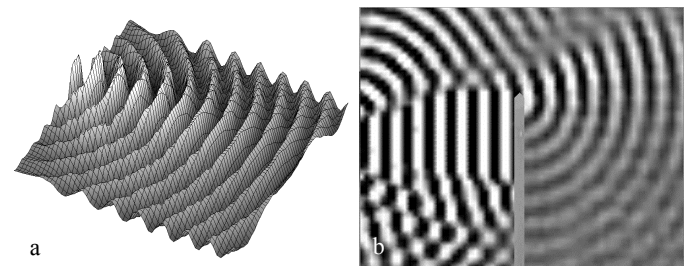


Bild 2: Schallfeld eines Lautsprechers ohne und mit Hindernis

Das Bild 2a zeigt als 3D-Darstellung die gemessene Kugelwelle, die von einem Lautsprecher ausgeht. In Bild 2b ist eine zweidimensionale Darstellung des Schallfeldes wiedergegeben, in das zusätzlich ein Schallschirm eingefügt wurde. Man erkennt, wie die Schallwelle vom Schirm reflektiert wird und sich zwischen Schirm und Lautsprecher eine stehende Welle bildet. Die vom Schirm reflektierte Welle interferiert mit der einfallenden Welle. Außerdem ist die Beugung hinter dem Schallschirm zu sehen.

3.2 Schallfeld eines Ultraschallstrahlers

Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die frequenzabhängige Darstellung des Schallfeldes eines Ultraschallstrahlers. Bei den zwei Hauptabstrahlungsfrequenzen wird jeweils links im Bild 3 ein Momentanwert des Schallfeldes gezeigt. Rechts ist der zugehörige Schallpegel (Richtcharakteristik) wiedergegeben.

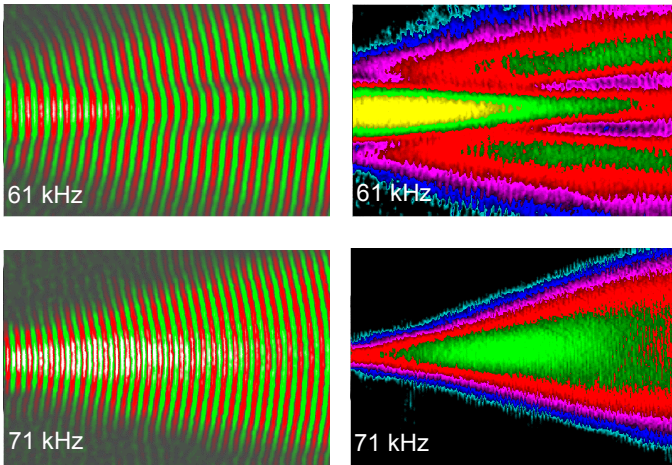


Bild 3: Schallfeld eines Ultraschallstrahlers; links: Momentanwert-Feld des Schalldrucks, rechts: Amplitudenpegel-Feld (Richtcharakteristik)

3.3 Schallfeld einer Orgelpfeife

Die folgende Darstellung zeigt das Nahfeld einer Orgelpfeife. Beim Grundton ist die Orgelpfeife mit $\lambda/2$ noch klein gegen die Wellenlänge, so dass im Nahfeld keine besonderen Effekte zu sehen sind. In Bild 4 ist deshalb das Schallfeld der ersten und dritten Oberwelle dargestellt. Bild 4a zeigt, wie die Schallabstrahlung der 1. Oberwelle vom Labium und von der Pfeifenmündung gegenphasig erfolgt. Die 3. Oberwelle (Bild 4b) wird fast nur noch von der Mündung als Kugelwelle abgestrahlt.

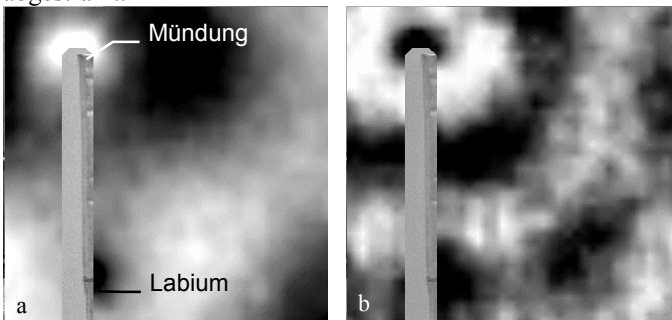


Bild 4: Schallentstehung aus Labium und Mündung einer Orgelpfeife
a) 1. Oberwelle, b) 3. Oberwelle

Dieses Beispiel zeigt, wie mit dem Visualisierungsverfahren Schallquellen in Abhängigkeit von der Frequenz geortet werden können und sich die oft schwer zu berechnenden Nahfelder untersuchen lassen.

3.4 Aerodynamische Schallquellen

Besonders interessant ist die Untersuchung von aerodynamischen Schallquellen, bei denen sowohl lokale Druckschwankungen (Pseudoschall, Wirbel) als auch abgestrahlte Schallwellen in feinsten Auflösung dargestellt werden können. Bild 5 zeigt die Schallentstehung an der Schneide einer Pfeife.

Bei der Grundwelle von 3,3 kHz sind lokale Druckmaxima und -minima erkennbar, die sich abwechselnd von der Schnei-

de lösen, mit dem Luftstrom im Bild nach rechts oben wandern und sich auflösen. Bei der ersten Oberwelle des Pfeifentons lösen sich Paare lokaler Druckmaxima und -minima von der Schneide. Die Schallwelle ist bei dieser Frequenz deutlich schwächer.

Zur Interpretation des Zusammenhangs zwischen lokalen Druckschwankungen und dem Schallfeld sind noch weitere Untersuchungen erforderlich.

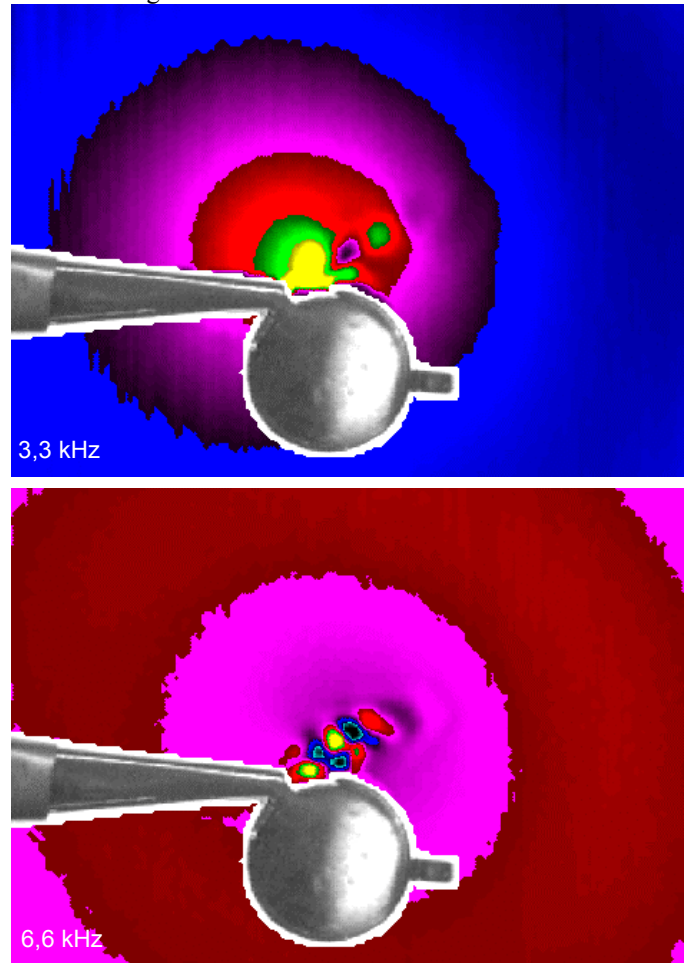


Bild 5: Schallemission einer Pfeife. Oben: Grundwelle; Unten: 1. OW

4 Anwendung

Das neue Verfahren zur Visualisierung von Schallfeldern wurde bisher erst an wenigen Objekten erprobt. Dennoch sind bereits vielfältige Einsatzmöglichkeiten abzusehen wie z.B. Design und Prüfung von akustischen Wandlern, Lärmquellenortung, Strömungsakustik, Ultraschalltechnik, Musikinstrumentenbau, raumakustische Schallfelduntersuchungen und die anschauliche Wissensvermittlung.

5 Literatur

- [1] Stieper, B.; Oeverdick, J.: Verfahren zur Darstellung eines Schallfeldes. Offenlegungsschrift DE19844870
- [2] Dierks, K.; Schuart, M.: Messplatz zur Visualisierung von Schallfeldern. Fachtagung Informations- u. Mikrosystemtechnik, Magdeburg, 1998, S. 79-86
- [3] Reibold, R.: Beugungsoptische Tomographie zur Untersuchung von Ultraschallwellen. PTB-MA-9, Vorträge des 64. PTB-Seminars, 1987, S. 103-114
- [4] Litfin, G.: Technische Optik in der Praxis. Springer, 1997
- [5] D'Ans, J.; Lax, E.: Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Springer 1949