

Das Unhörbare sehen

Ultraschall mittels Schlierentechnik visualisieren

Tim Hetkämper, Leander Claes, Bernd Henning

Obwohl Ultraschall für den Menschen weder hör- noch sichtbar ist, sind die Einsatzgebiete sehr vielfältig. Daher ist es für die Untersuchung von akustischen Phänomenen und die Analyse von technischen (Ultraschall-)Komponenten von Interesse, die Schallausbreitung darstellen zu können. Eine Methode dazu ist die sogenannte Schlierentechnik, welche in diesem Artikel vor- gestellt wird.

Einleitung

Schall mit Frequenzen oberhalb des menschlichen Hörbereichs wird als Ultraschall bezeichnet. Damit ist er für Menschen nicht wahrnehmbar. Trotzdem ist Ultraschall in vielen Bereichen präsent – in Industrie und Forschung zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und Materialcharakterisierung, in der Medizin zur Diagnose und Therapie, sowie im Alltag zur Entfernungsmessung (Einparkhilfe beim Auto) und in Durchflussmesssystemen. Um die Ultraschallwellenausbreitung untersuchen zu können, ist es von großem Interesse, die Wellenausbreitung sichtbar zu machen. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten. Ein akustisches Verfahren ist der Einsatz eines Mikrofons bzw. in Flüssigkeiten eines Hydrofons mit Sensitivität im untersuchten Frequenzbereich. Das Hydrofon wird Punkt für Punkt durch das zu untersuchende Volumen bewegt und der Schallwechseldruck erfasst. Anschließend werden die Messdaten visualisiert. Da das Hydrofon in das Schallfeld eingebracht werden muss und dieses ggf. beeinflusst, handelt es sich um ein invasives Messverfahren. Außerdem ist das Verfahren zeitaufwendig, weil das gesamte Messvolumen abgescannt werden muss, während die Messbedingungen konstant gehalten werden. Eine andere Methode zur Visualisierung der Ausbreitung von Schallwellen ist die Schlierentechnik. Hierbei handelt es sich um ein optisches Verfahren; ein Einbringen eines Sensors in das Schallfeld ist nicht notwendig. Die Schlierentechnik ermöglicht die Visualisierung von lokalen Dichteänderungen in optisch transparenten Medien und wird daher häufig zur Visualisierung von Strömungen genutzt, zum Beispiel in Windkanälen. Damit eignet sie sich insbesondere auch zur Darstellung von Schallwellen, da auch Schallwellen eine lokale Dichtemodulation im Ausbreitungsmedium verursachen. Im Folgenden

Seeing the Inaudible – Visualising Ultrasound with Schlieren Imaging

While ultrasound is imperceptible to humans, there are numerous and diverse technical and scientific applications. Thus, it is of special interest to depict sound propagation in order to examine acoustic phenomena and analyse the behaviour of technical (ultrasound) components. A method employed for this purpose is schlieren imaging, which is introduced in this article.

wird zunächst die Geschichte der Schlierentechnik erläutert, um dann einen konkreten Aufbau zur Visualisierung von Schallwellen zu beschreiben und mit diesem aufgenommene Ergebnisse zu präsentieren.

Geschichte der Schlierentechnik

Die Schlierentechnik wurde maßgeblich von August Toepler (1836–1912) geprägt. Obwohl es zuvor bereits ähnliche Arbeiten gab, war es August Toepler, der den Begriff „Schlieren“ etablierte und das wissenschaftliche Potenzial erkannte. Anfänglich versuchte er, die Qualität von Gläsern in Optiken darzustellen. Er selbst beschreibt die ursprüngliche Bedeutung des Begriffs 1864 wie folgt [1]: „Schlieren nennt man bekanntlich bei den optischen Gläsern Streifen und ganze Partien, welche von der Dichte der gesamten Glasmasse abweichen.“ Ungefähr zur selben Zeit entwickelte Léon Foucault (1819–1868) in Frankreich das heute als „Foucaultsches Schneidenverfahren“ [2] bezeichnete Verfahren, bei dem mithilfe einer möglichst geraden, dünnen Kante in Form einer Messerschneide der Schliff eines Parabolspiegels überprüft werden kann [3]. Auch in Toeplers „Schlieren-Apparat“ wird eine gerade, dünne Kante als optisches Filter benötigt. Er verwendete seinen Messaufbau aber nicht nur zu Qualitätsuntersuchungen, sondern schreibt [1]: „Ich erkannte ferner, dass dieselbe Methode, in entsprechender Weise modifiziert, sich auch auf das Gebiet wissenschaftlicher Untersuchungen würde übertragen lassen, und zwar überall da, wo es sich um kleine Variationen in der Dichte oder dem Brechungsvermögen durchsichtiger Medien handelt.“ Auch in der englischen Literatur wird der Begriff „schlieren“ benutzt. Aufgrund der eingeschränkten technischen Möglichkeiten zu Toeplers Zeit hat er seine Beobachtungen zunächst von Hand nachgezeichnet. Durch den technischen Fortschritt sowie

die Arbeiten weiterer Personen konnte die Schlierentechnik weiterentwickelt und die Funktionsweise theoretisch erklärt werden. Eine gute Übersicht gibt Settles [3], wobei die Hauptanwendungen hier die Analyse von Strömungen und Schockwellen sind. Im Bereich der Ultraschallwellen sind vor allem die Arbeiten von Raman und Nath [4] zu erwähnen, welche eine Theorie zur Beschreibung des Einflusses einer Ultraschallwelle auf Licht herleiteten.

Der bei der Schlierentechnik ausgenutzte Effekt ist in Abbildung 1 dargestellt. Eine Ultraschallwelle mit der Wellenlänge λ_{US} propagiert durch ein Medium. Die Schallwelle kann über den Schallwechseldruck \tilde{p} beschrieben werden, welcher dem statischen Druck p_0 überlagert ist. Durch die lokale Änderung des Drucks ändert sich im Medium auch die Dichte sowie der Brechungsindex. Der Zusammenhang zwischen Schallwechseldruck und Brechungsindex wird durch den sogenannten piezooptischen Koeffizienten beschrieben. Wird die Ultraschallwelle so beleuchtet, dass sich die Strahlung als ebene elektromagnetische Welle orthogonal zur Schallwelle ausbreitet, führt die lokale Dichtemodulation zu Phasenverschiebungen in den elektromagnetischen Wellenfronten. Ein Problem ist, dass Phasenverschiebungen nicht direkt beobachtet werden können. Kameras sowie das menschliche Auge registrieren die mittlere Intensität I der einfallenden Strahlung. Diese ergibt sich aus dem Poynting-Vektor durch Betragsbildung und zeitliche Mittelwertbildung als

$$I(x, y) \propto |\vec{E}(x, y)|^2 ,$$

also proportional zum Betragsquadrat des elektrischen Feldes \vec{E} . Da durch die Schallwelle näherungsweise nur die Phase, nicht aber die Amplitude des elektrischen Feldes beeinflusst wird, ist aufgrund der Betragsbildung keine direkte Beobachtung von

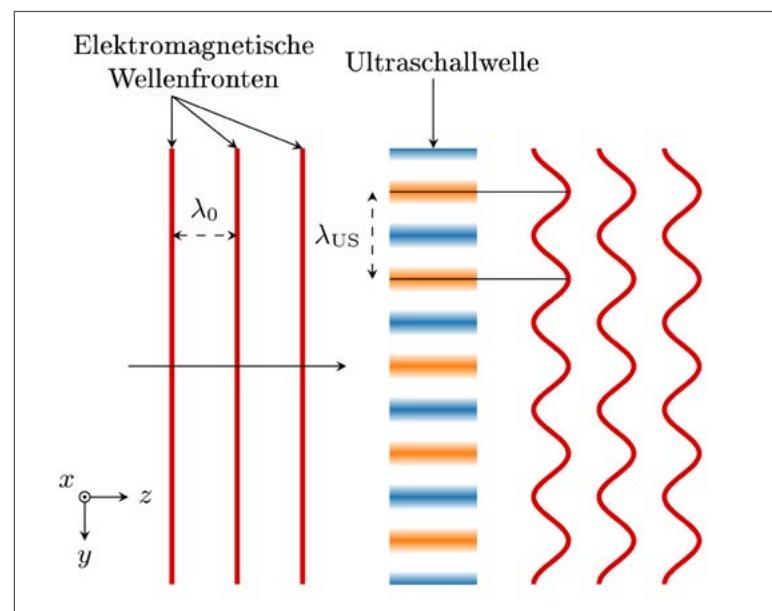


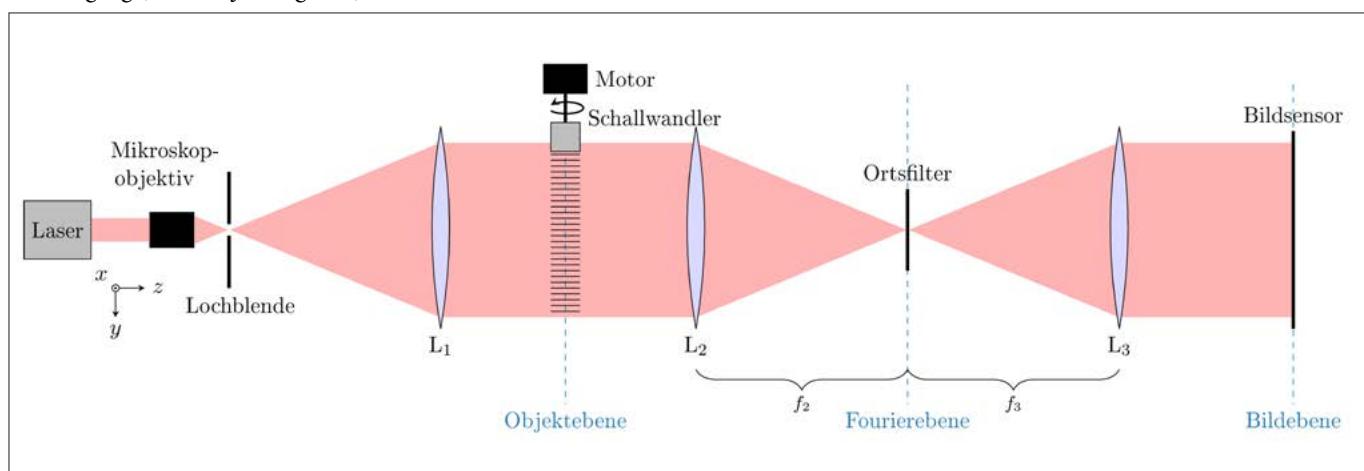
Abb. 1: Phasenverschiebung ebener elektromagnetischer Wellen verursacht durch eine Ultraschallwelle.

Schallwellen möglich. Daher wird ein Messaufbau, wie beispielsweise von August Toepler entworfen, benötigt, um die Schallwelle sichtbar zu machen.

Messaufbau

Abbildung 2 zeigt einen schematischen Aufbau zur Aufnahme von Schlierenabbildungen. Mithilfe eines Mikroskopobjektivs, einer Lochblende und der Linse L_1 wird Laserstrahlung zunächst aufgeweitet und dann parallelisiert, sodass die dahinter befindliche Objektebene homogen und kohärent beleuchtet wird. In der Objektebene befindet sich zum Beispiel ein Schallwandler, welcher Schallwellen orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlung aussendet. Der Schallwandler ist in einem transparenten Becken aufgehängt, welches mit Wasser gefüllt ist. Der nutzbare Messbereich ist kreisförmig mit einem

Abb. 2: Darstellung eines Aufbaus zur Aufnahme von Schlierenabbildungen als Fourieroptisches System mit eingezeichnetem Beleuchtungsstrahlengang (nicht maßstabsgetreu).



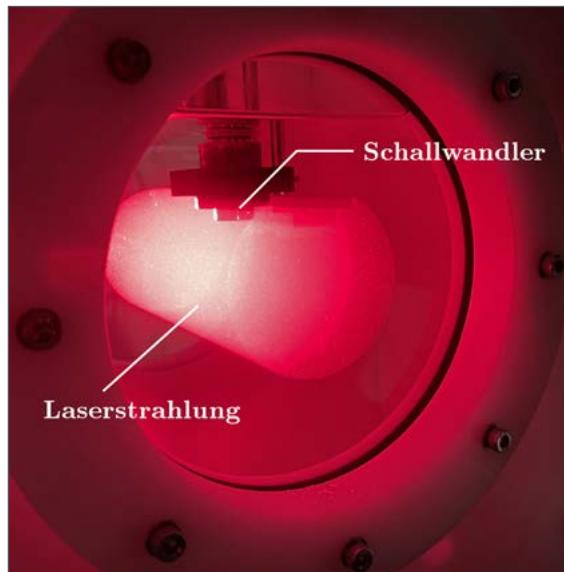
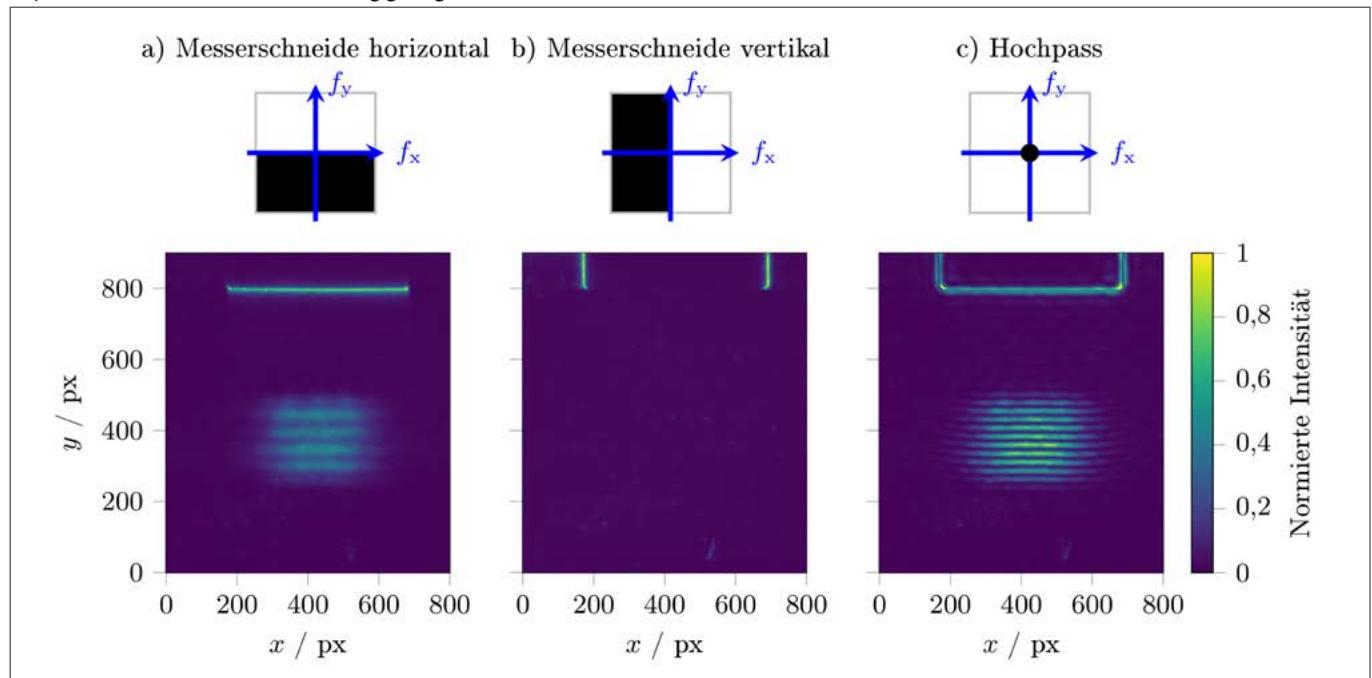


Abb. 3: Ultraschallwandler im Wasserbecken; illuminiert durch Laserstrahlung. Der auf der Glasscheibe sichtbare kreisförmige Messbereich wird durch den Schatten des Schallwandlers unterbrochen.

Durchmesser von ca. 7 cm. Abbildung 3 zeigt den Aufbau mit Blickrichtung zum Laser hin; der Messbereich entspricht dem rot erleuchteten Zylinder im Becken. Hinter dem Becken befindet sich eine Anordnung, welche eine örtliche Filterung ermöglicht und sich näherungsweise mithilfe der Fourieroptik beschreiben lässt. Diese Anordnung besteht aus einer weiteren Linse L_2 und einer Digitalkamera mit Objektiv. Zur Modellierung wird angenommen, dass eine Linse L_3 im Abstand der Summe der Brennweiten $f_2 + f_3$ positioniert ist. Orthogonal zur optischen Achse am Ort des Brennpunkts von L_2 und L_3 befindet sich die sogenannte Fourierebene, da hier die 2D-Fouriertransformation der Abbildung in der Objektebene beobachtet werden kann [2]. Durch die Linse L_3 wird die Objektebene auf die sogenannte Bildebene abgebildet, um mithilfe eines Bildsensors eine Abbildung aufzeichnen zu können. Der Bildsensor dreht das Bild um, sodass der hintere Teil des Messaufbaus insgesamt betrachtet eine inverse Fouriertransformation durchführt. Diese Kamera wird auch zur Aufnahme der im Folgenden gezeigten Abbildungen verwendet. Der Bildsensor der Kamera digitalisiert die einfallende Intensität. Für qualitative Messungen werden Belichtungszeit der Kamera und die stroboskopische Laserbeleuchtung so aufeinander abgestimmt, dass der Messbereich des Sensors möglichst optimal ausgenutzt wird. Detailliertere Informationen zum Messaufbau finden sich in [5]. Wie zuvor erwähnt, können Phasenobjekte nicht direkt beobachtet werden. Daher wird bei klassischen Aufbauten in der Fourierebene ein Ortsfilter platziert, welches bestimmte Bereiche der Fourierebene abschattet. Beispielsweise kommt hier eine Messerschneide zum Einsatz, mit welcher eine Hälfte der Fourierebene abgeschattet werden kann. Abbildung 4 zeigt mit verschiedenen optischen Filtern aufgenommene Schlierenabbildungen. Das betrachtete Phasenobjekt ist jeweils identisch – ein Burst aus fünf Sinus-Perioden mit einer Frequenz von 1 MHz. In Abbildung 4 a) ist die Messerschneide horizontal ausgerichtet, sodass die untere Hälfte der Fourierebene abgeschattet wird.

Abb. 4: Schlierenabbildungen mit verschiedenen optischen Filtern aufgenommen. Eine Darstellung des optischen Filters in der Fourierebene ist jeweils über der Schlierenabbildung gezeigt.



ebene abgeschattet wird. Die Umrisse des Schallwandlers sind jeweils oben in den Schlierenabbildungen zu erkennen. Ein Nachteil des Messerschneidefilters ist, dass Bildanteile, deren spektrale Komponenten in Richtung der Messerschneide liegen, in den gefilterten Abbildungen nicht sichtbar sind. In Abbildung 4 a) fehlt daher die vertikale Begrenzung des Schallwandlers. Besonders deutlich wird dieser Umstand bei einer vertikalen Ausrichtung der Messerschneide, wie in Abbildung 4 b) dargestellt. Hier ist zwar die vertikale Begrenzung des Schallwandlers sichtbar, dafür verschwinden aber die horizontalen Linien inklusive des Schallfeldes. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung eines optischen Hochpassfilters, welches aus einem lichtundurchlässigen Punkt besteht, der so justiert wird, dass Ortsfrequenzen nahe dem Ursprung der Fourierebene, also der optische Gleichanteil, herausgefiltert werden. Da das Hochpassfilter keine Richtungsabhängigkeit aufweist, ist der vollständige Schallwandler-Umriss erkennbar. Allerdings geht die Vorzeicheninformation der Ultraschallwelle verloren, sodass Minima und Maxima nicht mehr unterscheidbar sind und beide als Intensitätsmaximum sichtbar werden. Dadurch kann der Eindruck entstehen, dass die auftretende, örtliche Frequenz scheinbar doppelt so hoch ist. Alternativ kann zur Visualisierung von Schallwellen auch ein Phasenfilter eingesetzt werden, welches beispielsweise durch das Aufbringen von dünnen, transparenten Schichten auf eine Glasplatte hergestellt werden kann [6]. Solche Filter, welche früher als physikalische Objekte in den Strahlengang eingebracht und präzise justiert werden mussten, lassen sich mit den heutigen technischen Möglichkeiten flexibel umsetzen: Digitale Mikrospiegel-Arrays (Digital Micromirror Device, DMD), wie sie beispielsweise in Video-Beamern zum Einsatz kommen, vereinen auf einer kleinen Fläche zum Beispiel 1920 mal 1080 kippbare Mikrospiegel mit einem Abstand von jeweils $7,56\text{ }\mu\text{m}$. Da die Spiegel reflektieren und nicht transmittieren, muss der Messaufbau leicht modifiziert werden. Wird ein Mikrospiegel in Richtung der Kamera geklappt, entspricht dies einem Filter, welches die Ortsfrequenzen entsprechend der Position des Mikrospiegels in der Fourierebene transmittiert [7]. Aber auch ohne Filter kann die Ultraschallwelle beobachtet werden: Verstellt man den Fokus des Kameraobjektivs in geringem Maße, was im schematischen Aufbau einer kleinen Verschiebung der Linse L_3 entlang der z-Achse entspricht, ergibt sich Abbildung 5. Bei der Modellierung mithilfe der Fourieroptik entspricht dies gerade einer unvollständigen Transformation. Zur mathematischen Beschreibung kann die fraktionale Fouriertransformation herange-

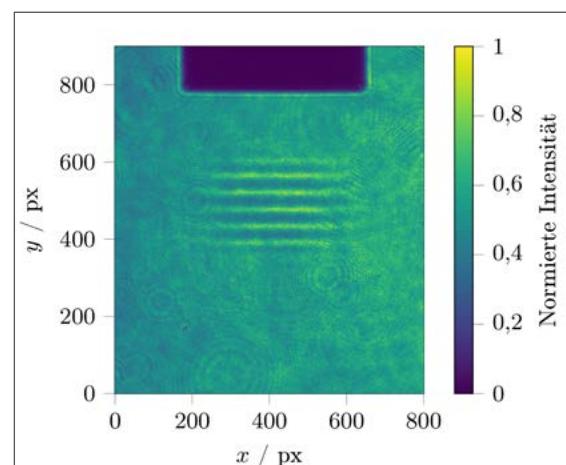


Abb. 5: Schlierenabbildung bei defokussiertem Objektiv (ohne optisches Filter).

zogen werden. Die Abbildung zeigt die Schallwelle, welche die Hintergrundhelligkeit positiv sowie negativ überlagert, es liegt also eine Vorzeicheninformation vor. Außerdem erfolgt die Darstellung unabhängig von der Ausbreitungsrichtung. Durch eine Referenzierung mit einer Schlierenabbildung ohne sendenden Schallwandler können die Hintergrundhelligkeit sowie die in Abbildung 5 sichtbaren Nichtidealitäten der optischen Komponenten in Form von Interferenzringen nahezu eliminiert werden. [5] Eine Herausforderung bei der Aufnahme von Schallwellen ist die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit. Bei einer Temperatur von 20°C beträgt die Schallgeschwindigkeit in Wasser $c_{\text{H}_2\text{O}} \approx 1482\text{ m/s}$, was 5335 km/h entspricht. Um propagierende Schallwellen zu visualisieren, wird der stroboskopische Effekt ausgenutzt: Statt die Belichtungszeit der Kamera extrem klein zu wählen, wird die Belichtung selbst gesteuert. Da diese durch einen Laser erzeugt wird, ist eine präzise Kontrolle möglich. Für eine typische Aufnahme wird der Laser mit einer Pulsdauer von 200 ns betrieben. Da ein einziger Puls nicht genügt, um den Bildsensor einer handelsüblichen Digitalkamera ausreichend zu beleuchten, werden mehrere Pulse pro Foto erzeugt. Bei einer Puls-Wiederholfrequenz von 5 kHz und einer in der Kamera eingestellten Belichtungszeit von $0,1\text{ s}$ setzt sich eine aufgenommene Abbildung also aus 500 einzelnen Pulsen zusammen. Es muss sichergestellt werden, dass sich die Schallwelle zu jedem Beleuchtungspuls an derselben Stelle befindet, was durch die Synchronisation des Laserpulses und des Ultraschall-Sendesignals erreicht werden kann. Durch Variation der Verzögerungszeit zwischen Beginn des Ultraschall-Sendesignals und des Laserpulses kann die Schallwelle an verschiedenen Positionen beobachtet und so schlussendlich auch eine Videosequenz der Schallausbreitung erstellt werden.

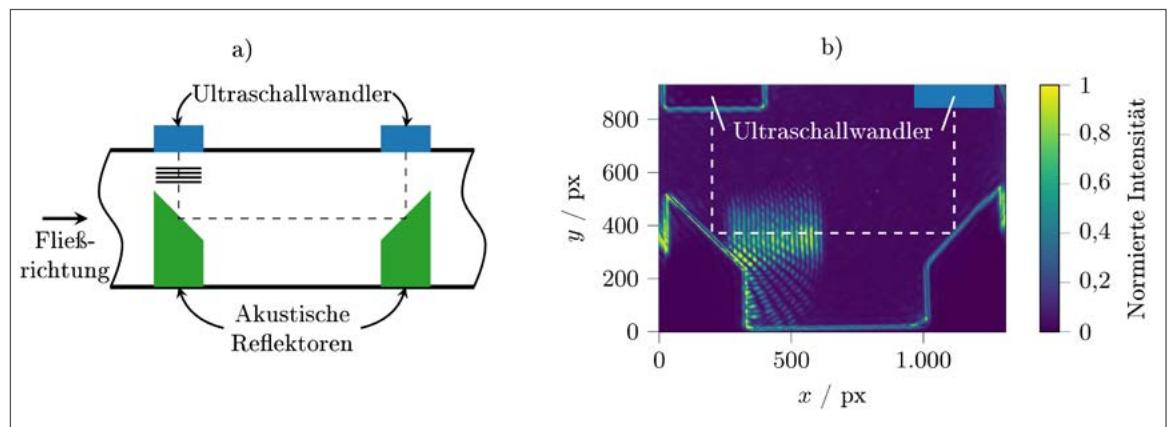


Abb. 6: Schematische Darstellung der Durchflussmessung in einem Rohr und Schlierenabbildung einer einem Durchflussmesssystem nachempfundenen Anordnung nach der Reflexion am ersten Reflektor.

Visualisierung von Ultraschallwellen

Nachfolgend werden einige Anwendungen der Schlierentechnik zur Visualisierung von Ultraschallwellen demonstriert. Anhand des Beispiels eines Durchflussmesssystems wird erläutert, wie neben dem Verhalten von Schallwandlern auch gezielt die Interaktion von Schallwellen mit akustischen Strukturen untersucht werden kann.

Durchflussmessung

Eine technische Anwendung für Ultraschall sind Durchflussmesssysteme. Diese Systeme werden heutzutage in vielen Industrie-Anlagen eingesetzt, sind aber auch aus dem Heimbereich bekannt: Als zuverlässige Alternative zu herkömmlichen mechanischen Wasserzählern gewinnen sie in diesem Bereich an Bedeutung. Wird ein solches System mit Temperatursensoren kombiniert, eignet es sich außerdem zur indirekten Messung der Wärmemenge. So kann in Mehrfamilienhäusern durch die Erfassung der Vor- und Rücklauftemperatur sowie des Durchflusses jedes Heizkreislaufs die pro Wohnung entnommene Wärmemenge ermittelt und als Grundlage für die Abrechnung herangezogen werden.

Eine schematische Anordnung eines Durchflussmesssystems ist in Abbildung 6 a) dargestellt. Innerhalb eines Rohres werden zwei akustische Reflektoren positioniert. Über den Reflektoren ist jeweils ein Schallwandler platziert, sodass sich über die Reflektoren ein Schallweg zwischen beiden Schallwandlern ergibt. Ohne Durchfluss ist die zum Zurücklegen des Schallweges benötigte Zeit in beide Richtungen identisch. Fließt ein Medium durch das Rohr, werden die vom linken Schallwandler ausgesandten Ultraschallwellen in Fließrichtung „mitgenommen“. Vom rechten Schallwandler ausgesandte Schallwellen bewegen sich jedoch auf dem horizontalen Weg entgegen der Fließrichtung. Daher benötigen sie eine längere Zeit, um dieselbe Strecke zurückzulegen. Aus der Lauf-

zeitdifferenz lässt sich bei bekanntem Querschnitt des Strömungskanals der Durchfluss (bzw. Volumenstrom) berechnen. Ein Durchflussmesssystem muss Laufzeitdifferenzen im Nanosekunden-Bereich messen können, was neben entsprechenden Anforderungen an die Elektronik auch eine möglichst ungestörte Schallausbreitung voraussetzt, damit das Empfangssignal zuverlässig detektiert werden kann. Daher ist es bei der Entwicklung von Durchflussmesssystemen von besonderem Interesse, die Schallausbreitung zu visualisieren, um mögliche Fehlerquellen aufzudecken. Abbildung 6 b) zeigt eine Schlierenabbildung einer einem Durchflussmesssystem nachempfundenen Anordnung. Die Reflektoren sind zwei jeweils in einem 45°-Winkel abgeschrägte Messingstäbe, welche auf einer Platte verschraubt sind. Die Abbildung zeigt den Zeitpunkt, zu dem eine vom Schallwandler über dem linken Reflektor ausgesandte Schallwelle gerade reflektiert wird. Nahe der rechten Ecke der Reflektorfläche ist ein schachbrettartiges Muster zu erkennen, welches durch Interferenzen zwischen den vertikal vom Schallwandler ausgesandten und den bereits horizontal reflektierten Schallwellen verursacht wird. Außerdem ist zu erkennen, dass sich ein Teil der Schallwellen nach unten ausbreitet, wobei ein fächerartiges Interferenzmuster auftritt.

Abstrahlcharakteristik

Für praktische Anwendungen ist die Abstrahlcharakteristik des Schallwandlers von Bedeutung. Der Schallwandler in Abbildung 6 b) entspricht dem aus den obigen Abbildungen 4 und 5 (Panametrics V303, Mittenfrequenz 1 MHz), weshalb diese zur Beurteilung des Auf- und Nachschwingens des Schallwandlers herangezogen werden können. Das Ultraschall-Sendesignal ist ein Burst aus fünf Sinus-Perioden, in Abbildung 5 sind jedoch sechs hellgelbe Linien, folglich sechs Perioden, erkennbar. Dies ist durch das mechanische Nachschwingen des Schall-

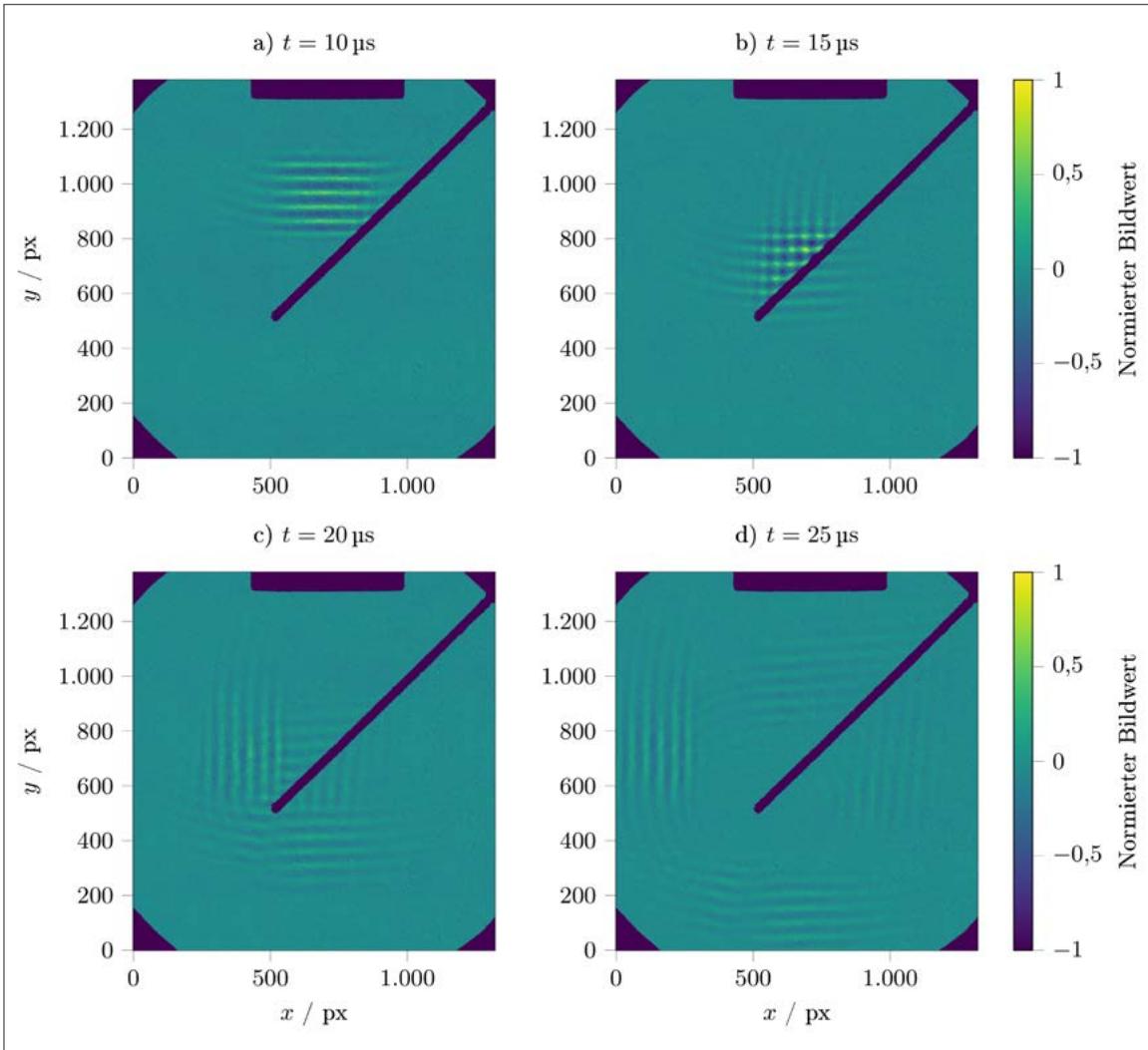


Abb. 7: Interaktion einer Ultraschallwelle mit einer dünnen Metallplatte zu verschiedenen Zeitpunkten [5]. Eine Videosequenz der Schallausbreitung steht online auf der Akustik-Journal-Webseite (Hörbeispiele, Videos) zur Verfügung.

wandlers zu begründen. Außerdem wird vor allem in Abbildung 4 c) deutlich, dass die unteren, zuerst ausgesandten Wellenzüge eine geringere Intensität aufweisen, da der Schallwandler erst einschwingen muss. Insgesamt entspricht die ausgesandte Ultraschallwelle aber nahezu der elektrischen Anregung und es lässt sich festhalten, dass sich der Schallwandler zur Aussendung und zum Empfang kurzer Bursts eignet. Damit ist beim Einsatz in einem Durchflussmesssystem sichergestellt, dass Wellenpakete zuverlässig detektiert werden können. Zusätzlich können aus Schlierenabbildungen auch Öffnungswinkel und Nahfeldlänge eines Schallwandlers bestimmt werden. Um die Abstrahlcharakteristik eines Schallwandlers dreidimensional zu visualisieren, ist die Anwendung tomografischer Verfahren möglich [8].

Akustischer Reflektor

Im Durchflussmesssystem wird die ausgesandte Ultraschallwelle von einem Reflektor umgelenkt. Als Beispiel für einen imperfekten akustischen Reflektor

wird nachfolgend die Interaktion einer Ultraschallwelle mit einer dünnen Edelstahlplatte (Dicke 1 mm) analysiert. Abbildung 7 zeigt zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommene Schlierenabbildungen. Die Zeit t bezieht sich auf den Beginn des elektrischen Ultraschall-Sendesignals, welches ein Burst aus fünf Sinus-Perioden mit einer Frequenz von 1 MHz ist. 10 μ s nach Beginn der Anregung trifft die ausgesandte Ultraschallwelle rechts auf den Reflektor, welcher bereits einen kleinen Teil der Welle nach links reflektiert hat. Daher ist in der rechten Ecke ein Interferenzmuster zu erkennen. Noch deutlicher wird das Interferenzmuster in Abbildung 7 b). Unterhalb der Platte ist eine leicht phasenverschobene (bzw. seitlich versetzte) Schallwelle zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass an der Oberseite ein Teil der Welle in das Metall eingekoppelt wird und sich aufgrund der höheren Schallgeschwindigkeit im Metall schneller ausbreitet, als die ursprüngliche Schallwelle im Wasser. Dies führt beim erneuten Austreten der Schallwelle aus dem Metall zu einer Phasenverschiebung.

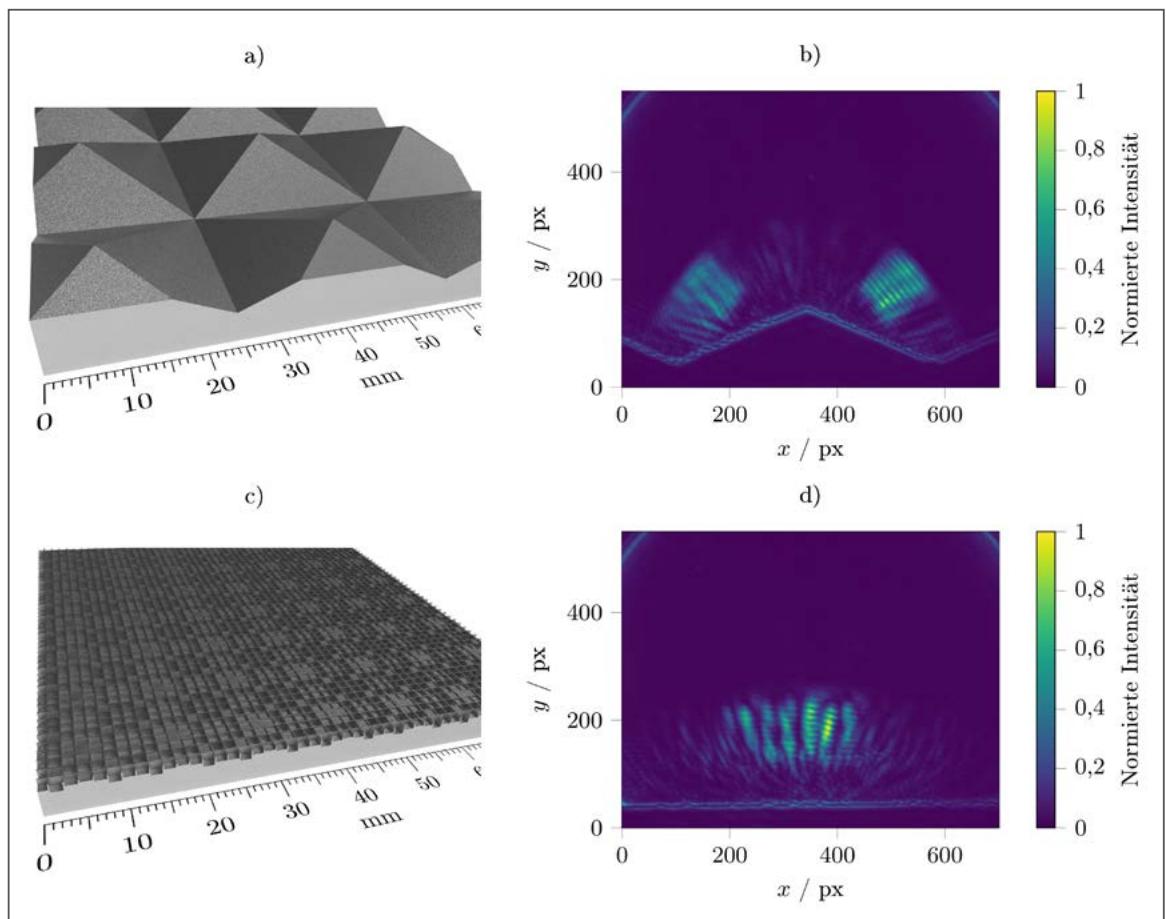


Abb. 8: Vergleich der reflektierten Ultraschallwellenpakete an verschiedenen strukturierten Oberflächen [9].

In Abbildung 7 c) und d) sind weitere Ausbreitungsrichtungen zu erkennen, welche durch Schallausbreitung innerhalb des Metalls und anschließende Auskopplung ins Wasser zu erklären sind. Die einfallende Schallwelle regt in der dünnen Edelstahlplatte aufgrund von Koinzidenz („Spuranpassung“) eine Plattenwelle an, welche sich in der Platte zum unteren Ende ausbreitet. Hier tritt ein Teil der Welle ins Wasser aus (Abbildung 7 c)), ein anderer Teil wird reflektiert und bewegt sich in der Platte wieder nach oben. Dabei strahlt die Plattenwelle ins Wasser ab („Leaky-Wellen“), was die beiden Wellenpakete links und rechts der Edelstahlplatte erklärt (Abbildung 7 d)). Insgesamt lässt sich also festhalten, dass beim Einsatz eines akustischen Reflektors nicht nur „Einfallsinkel = Ausfallwinkel“ gilt, sondern auch die Schallausbreitung im Reflektor selbst sowie Eigenresonanzen und Koinzidenzeffekte berücksichtigt werden müssen.

Strukturierte Oberflächen

Reflexionen an Messzellen-Wänden können zu Störsignalen führen, welche es zu vermeiden gilt. Dazu können strukturierte Oberflächen eingesetzt werden. Wenn eine gute chemische Beständigkeit der Strukturen für den Einsatz in verschiedenen Flui-

den und über einen großen Temperaturbereich gefordert ist, bietet sich als Material Edelstahl an. Für die Herstellung dieser feinen Strukturen wird die additive Fertigung mittels selektivem Laserschmelzen genutzt. Mithilfe der Schlierentechnik kann das Verhalten verschiedener Strukturen ausgewertet und verglichen werden. In Abbildung 8 sind die an zwei verschiedenen Oberflächen reflektierten Ultraschallwellenpakete dargestellt. Die Frequenz der einfallenden Wellen beträgt 2 MHz. Abbildung 8 a) zeigt das Modell einer gefertigten Struktur, welche aus mehreren Pyramiden besteht. Solche Strukturen werden im Hörbereich als Absorber ausgeführt, wobei ein Absorbermaterial mit einer Schallkennimpedanz nahe des umgebenden Mediums gewählt wird, sodass akustische Wellen in den Absorber transmittieren können und nur ein geringer Anteil reflektiert wird. Für die hier gegebene Kombination Wasser und Edelstahl unterscheiden sich jedoch die Schallkennimpedanzen deutlich, sodass zu erwarten ist, dass einfallende Schallwellen in geringerem Maße in das Metall einkoppeln. Wie in der Schlierenabbildung in Abbildung 8 b) dargestellt, wird der Großteil des Wellenpakets gerichtet nach rechts und links reflektiert. Eine Reflexion zurück nach oben findet (fast) nicht statt. Somit ist eine solche Struktur geeignet

für Anwendungen, bei denen ein senkrechter Einfall erfolgt und die seitlich gerichteten Reflexionen tolerierbar sind. Eine andere aus dem Hörbereich bekannte Struktur sind Schroeder-Diffusoren, die auch als Quadratic Residue Diffusers (QRD) bezeichnet werden. Solche Diffusoren lassen sich auch für den Ultraschallbereich auslegen, wobei die Strukturen aufgrund der kleineren Wellenlängen deutlich kleiner als im Hörbereich ausfallen. Das Modell des untersuchten Schroeder-Diffusors ist in Abbildung 8 c) dargestellt. Es besitzt Vertiefungen mit lateralen Abmessungen von 1,5 mm mal 1,5 mm und Tiefen, die aus einer Folge von Pseudozufallszahlen ermittelt werden. Die Schlierenabbildung in Abbildung 8 d) zeigt, dass das Ziel einer diffusen Reflexion mithilfe dieser Struktur erreicht wird. Damit gelangt verglichen mit der Pyramiden-Struktur allerdings auch ein größerer Anteil der Schallwellen zurück in Richtung des Schallwandlers [9].

Zusammenfassung und Ausblick

Die Schlierentechnik bietet eine Möglichkeit zur Visualisierung von Schallwellen. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, können grundlegende Effekte der Akustik, wie das Verhalten von akustischen Reflektoren und Diffusoren, anschaulich demonstriert werden. Damit eignet sich die Schlierentechnik auch zur Untersuchung vieler praxisrelevanter Fragestellungen, vom Schwingverhalten eines Schallwandlers, der Darstellung der Abstrahlcharakteristik bis hin zur Analyse der Schallausbreitung in Messzellen. In Zukunft könnten optische Filter beispielsweise auch mit sogenannten Microshutter-Arrays realisiert werden, welche momentan in einem ersten Praxis-Einsatz im James-Webb-Weltraumteleskop verwendet werden [10]. Die in diesem Beitrag dargestellten Untersuchungen beschränken sich auf die Visualisierung von Schallwellen in optisch transparenten Fluiden. Darüber hinaus wäre es möglich, den Aufbau auf andere elektromagnetische Wellenlängenbereiche außerhalb des sichtbaren Lichtspektrums zu erweitern, sodass auch die Visualisierung von Schallwellen in nicht optisch transparenten Fluiden und Festkörpern gelingt.

Literatur

- [1] Toepler, A.: Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode. Ein Beitrag zur Experimental-Physik. Bonn: Max Cohen & Sohn, 1864.
- [2] Stössel, W.: Fourieroptik. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993. ISBN: 978-3-662-01619-0.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-01618-3>
- [3] Settles, G. S.: Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media. Experimental fluid mechanics. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2001. ISBN: 3-540-66155-7
- [4] Raman, C. V.; Nagendra Nath, N. S.: The diffraction of light by high frequency sound waves: Part I. In: Proceedings of the Indian Academy of Sciences – Section A. Bd. 2. Springer. 1935, S. 406–412.
- [5] Hetkämper, T.; Koch, K.; Claes, L.; Henning, B.: Phase-preserving methods to visualise ultrasonic fields with schlieren imaging. In: tm – Technisches Messen 90.2, S. 103–112, 2023.
<https://doi.org/10.1515/teme-2022-0112>
- [6] Reichel, E.; Schneider, S.; Zagar, B.: Characterization of Ultrasonic Transducers Using the Schlieren-Technique. In: 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Bd. 3, S. 1956–1960, 2005.
<https://doi.org/10.1109/IMTC.2005.1604513>
- [7] Unverzagt, C.; Olfert, S.; Henning, B.: A new method of spatial filtering for Schlieren visualization of ultrasound wave fields. In: Physics Procedia 3.1, S. 935–942, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.120>
- [8] Hetkämper, T.; Claes, L.; Henning, B.: Vorzeichenrichtige tomographische Rekonstruktion von Ultraschallfeldern mit Hilfe der Schlierentechnik. In: tm – Technisches Messen 90.s1, S. 49–54, 2023.
<https://doi.org/10.1515/teme-2023-0069>
- [9] Claes, L.; Zeipert, H.; Koppa, P.; Tröster, T.; Henning, B.: Additively manufactured acoustic diffuser structures for ultrasonic measurement applications. In: Proceedings of Meetings on Acoustics. 2017.
<https://doi.org/10.1121/2.0000688>
- [10] Rawle, T. D.; Giardino, G. et al: In-flight performance of the NIRSpec Micro Shutter Array. 2022. arXiv: 2208.04673 [astro-ph.IM]. ■



**Tim Hetkämper,
M.Sc.**
Universität Paderborn, Elektrische
Messtechnik



**Dr.-Ing. Leander
Claes**
Universität Paderborn, Elektrische
Messtechnik



**Prof. Dr.-Ing.
Bernd Henning**
Fachgebetsleiter,
Universität Paderborn, Elektrische
Messtechnik