

# Eigenschaften und hoch auflösende Anwendungen interferenz-optischer Hydrophone

Martin Klann, Christian Koch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich Akustik, Labor für Ultraschall, email: ultrasonics@ptb.de

## Einleitung

Interferenzoptische Hydrophone erlauben die hoch aufgelöste Messung von Ultraschall-Feldgrößen in Wasser. An der PTB wurde ein Messsystem entwickelt, das die schalldruckabhängige Änderung des Reflexionskoeffizienten eines optischen Vielschichtsystems auswertet. Das empfindliche Element ist ein Mikro-Fabry-Perot-Interferometer aus dünnen harten dielektrischen Schichten, die auf einer Glasfaserspitze oder einem ausgedehnten planen Glassubstrat aufgebracht sind. Der einfallende Schalldruck führt zu einer elastischen Deformation der Schichten und damit zur Änderung der optischen Reflexionscharakteristik. Insbesondere das beschichtete Plansubstrat hat sich aufgrund seiner über einen weiten Frequenzbereich konstanten Übertragungsfunktion als Referenzsystem zur Sekundärkalibrierung von Hydrophonen und Glasfasersensoren geeignet erwiesen <sup>(1)</sup>.

Beschichtete Plansubstrate ermöglichen die Messung an einer Reihe von Punkten innerhalb eines Schallfeldes, indem die Reflexionsänderung eines normal oder schräg einfallenden Laserstrahl ausgewertet wird. Es wird ein Aufbau diskutiert, in dem der Messpunkt auf der Sensorfläche zunächst manuell, dann automatisiert mittels eines rotierenden Polygonspiegels verschoben wird. Erste Messungen an Schallfeldern von Breitband-Schallwandlern im Pulsbetrieb belegen eine hohe Auflösung im Raum- sowie Frequenzbereich, die mit herkömmlichen Membran- oder Nadelhydrophonen nur schwer zu erreichen ist.

## Sensorprinzip

In den hier vorgestellten Messungen werden 19-Schicht-Systeme aus alternierend hoch brechendem  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  ( $n_{HI} = 2.3$ ) und niedrig brechendem  $\text{SiO}_2$  ( $n_{LO} = 1.48$ ) verwendet (vgl. Ausschnittvergrößerung in Abbildung 1). Durch eine mittlere Abstandsschicht der optischen Dicke  $\lambda/2$  (oder Vielfachen davon) entspricht diese Konfiguration einem optischen Schmalbandfilter und weist ein Transmissionsmaximum bei etwa  $\lambda=680$  nm mit einer Halbwertsbreite von 4 nm auf. Der einfallende Schalldruck ändert die Schichtdicken sowie die Brechungsindizes. Dadurch verschiebt sich das Transmissionspektrum gegen die Wellenlänge, was sich für eine feste Laserwellenlänge  $\lambda$  als Änderung des Reflexionskoeffizienten  $R$  auswirkt. Die maximale Änderung der Reflexion pro einfallender Schalldruckamplitude  $dR/dp = 3 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$  ergibt sich mit einer Wellenlänge an der Flanke Transmissionsmaximums bei etwa  $R = 0.25$ . Die Abstimmung auf diesen Arbeitspunkt kann über die Wellenlänge oder aufgrund der winkelabhängigen optischen Phasendicken der Schichten über den Einfallswinkel vorgenommen werden. Die Druckabhängigkeit der Reflexionskoeffizienten des Gesamtsystems ist des weiteren eine Funktion der elastischen und elasto-optischen Eigenschaften der Schichtmaterialien.

Das Licht einer rauscharmen Laserdiode ( $P_0 = 15$  mW, 5 mW am Schichtsystem) wird unter einem Einfallswinkel von etwa 5 Grad auf das Schichtsystem fokussiert (vgl. Abbildung 1). Das reflektierte Licht wird von einer Photodiode detektiert, verstärkt und mit einem Speicheroszilloskop aufgenommen.

## 2D-Messaufbau

Die ausgedehnte plane Geometrie der Interferenzbeschichtung auf einem Glassubstrat ermöglicht die Erfassung des Schalldrucks in Schnittfläche durch ein Schallfeld. Es existieren verschiedene Möglichkeiten, die dazu nötige Verschiebung des Messpunktes auf der Sensorfläche zu realisieren.

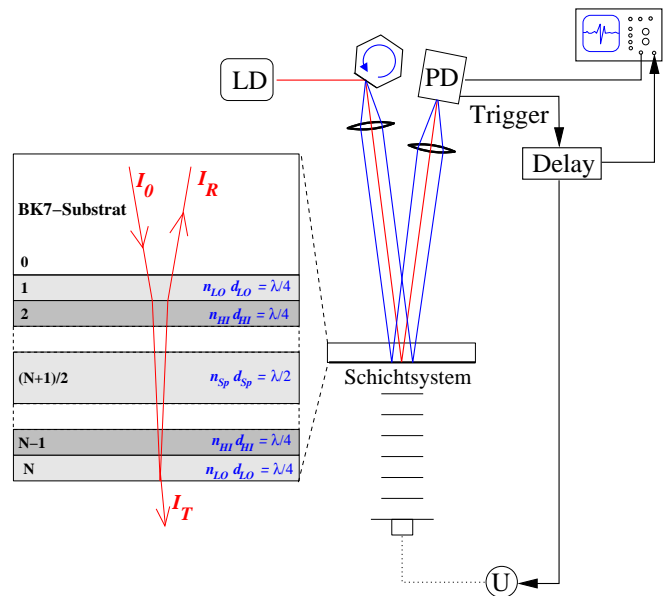


Abbildung 1: Links: Detailansicht des dielektrischen Schichtsystems. Rechts: Aufbau zur Linienabtastung mit Polygon-Scanner; LD: Laserdiode, PD: Photodiode, U: Impuls-generator zur Wandleransteuerung.

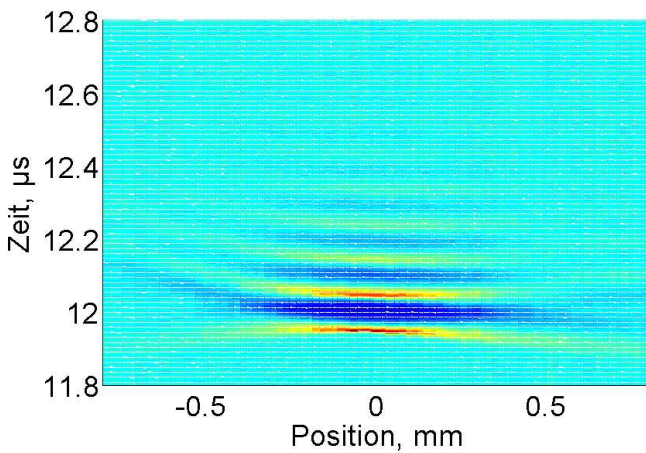
In einem Vorversuch wurde ähnlich wie in <sup>(2)</sup> zunächst der gesamte optische Aufbau mit Lichtablenkung, Fokussieroptik und Photodiode verschoben, während Sensor und zu untersuchendes Schallfeld ortsfest blieben. Diese Messung verdeutlichte, dass es aufgrund lateraler Variationen der Schichtdicken zu Verschiebungen des Arbeitspunktes über die Sensorfläche kommt. Ohne Nachführung der Wellenlänge oder des Einfallswinkels wie in <sup>(3)</sup> bedeutet dies eine Einschränkung der nutzbaren Sensorfläche auf einen Bereich von etwa 5 mm Durchmesser. Mit verbesserten Beschichtungsverfahren werden grössere Sensorflächen möglich.

Zur Realisierung einer seriellen Linienabtastung wurde ein Polygon-Spiegelrad zur Strahlableitung verwendet, vgl. Abbildung 1; dadurch wird die Anzahl bewegter Teile erheblich reduziert. Die durch Drehung des Spiegels erzeugte Winkeländerung wird über eine Linse ( $f = 50$  mm) in eine Parallelverschiebung transformiert und die reflektierte Lichtintensität wiederum über eine Photodiode aufgenommen und im Oszilloskop dargestellt. Als Triggerflanke für jede Einzelmessung dient der schnelle Anstieg des DC-Signals der Photodiode, der beim Einschwenken des reflektierten Laserstrahls auf die Photodiode entsteht. Der Ultraschallimpuls wird mit einstellbarer Verzögerung nach diesem Trigger ausgesendet. Das Oszilloskop nimmt nach Abwarten der Schalllaufzeit zwischen Sendewandler und Sensorfläche das dann schalldruck-modulierte reflektierte Lichtsignal auf. Für die Dauer des Schallimpulses von

wenigen Mikrosekunden kann der Aufpunkt des Laserstrahls auf dem Schichtsystem als ortsfest angenommen werden. Für jedes Überstreichen der Sensorfläche wird nun sukzessive die Verzögerung zwischen Trigger und Sendepuls durchgestimmt, so dass der Treffpunkt des Laserstrahls mit dem Schallimpuls über die Sensorfläche wandert.

### Messungen

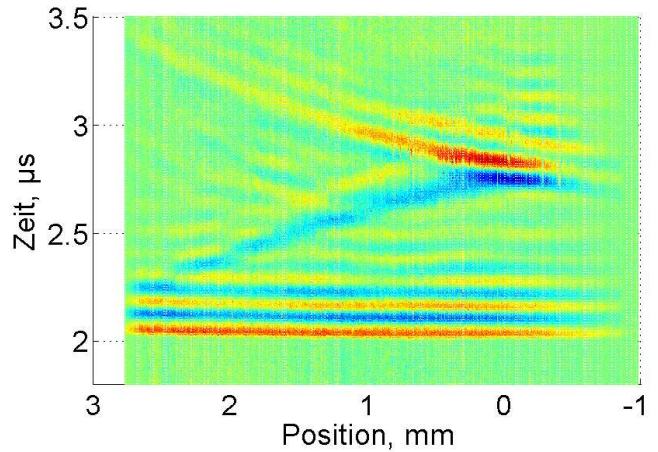
In der Messung wird der variable verzögerte Trigger durch zwei gekoppelte Funktionsgeneratoren realisiert. Zunächst wird aus dem Gleichspannungssignal der Photodiode ein Triggersignal generiert. Nach der momentan eingestellten Verzögerung zu diesem Initialtrigger gibt der Ultraschallwandler einen Schallimpuls ab, der auf die Sensorfläche trifft und den Reflexionskoeffizienten moduliert. Ein Speicheroszilloskop nimmt eine Sequenz aus 100 Schalldruckverläufen (jeweils 400 Samples @ 250 MSample/sec) mit durchlaufender Triggervverzögerung und damit an durchlaufender Position auf. Übertragung in einen Messrechner und kurze Signalverarbeitung (MATLAB) ergibt innerhalb von etwa 10 Sekunden den in Abbildung 2 dargestellten Linienscan durch die dynamische Schalldruckverteilung eines fokussierenden Ultraschallwandlers.



**Abbildung 2: Linienscan der Schalldruckverteilung im Fokus eines fokussierenden Wandlers (Breitbandwandler Typ Deutsch TS 6 PB 4-20 P 15, Fokusslänge 15 mm, Frequenzbereich 4-20 MHz, Impulsanregung mit Spitzenspannung 120 V).**

Abbildung 2 zeigt zusammengefasst die Schalldruckverläufe (die Zeit läuft von unten nach oben) an verschiedenen Messpositionen (Abszisse in Abb. 2). Der Nullpunkt der Zeit-Achse ist durch den Zeitpunkt der Anregung des Schallwandlers definiert, während der Nullpunkt der Ortsachse auf der Schallfeldachse liegt. In dieser Darstellung erkennt man deutlich die Fokussierung des Schallfeldes auf einen schmalen Bereich um die Schallfeldachse. Bei den in diesem Schallfeld auftretenden Spitzendrücken von etwa 5 MPa im Fokus genügt die ungemittelte Einfachmessung der Druckverläufe für die räumliche Darstellung des Schallfeldes in Abbildung 2.

Um das Potential dieses Verfahrens zu verdeutlichen, wurde eine Schallfeldmessung an einem runden planen Ultraschallwandler mit Durchmesser 6,35 mm durchgeführt. Die Sensorfläche befand sich dabei in 3 mm Abstand parallel zur Wandleroberfläche. Man erkennt von unten nach oben entlang der Zeitachse zunächst den eintreffenden Direktschall von der Wandleroberfläche, die durch den kurzen Spannungsimpuls zu einer Schwingung mit schnell abnehmender Amplitude angeregt wurde.



**Abbildung 3: Linienscan der Schalldruckverteilung eines planen Wandlers (Panametrics Breitbandwandler, Durchmesser 6,35 mm, Mittenfrequenz 10 MHz, Impulsanregung mit Spitzenspannung 350 V).**

Zusätzlich wird am Rand des Wandlers eine Randbeugungswelle erzeugt, die sich nach dem Huygensschen Prinzip von jedem Punkt des Randes ausbreitet und mittig oberhalb des Wandlers konstruktiv interferiert, was zu einer deutlich erhöhten Druckamplitude führt. Abbildung 3 ist aus zehn Einzelscans gemittelt und zeigt die beschichtungsbedingten Grenzen des Sensors, indem die Schallempfindlichkeit auf einen Bereich von etwa 3 mm beschränkt ist; ausserhalb dieses Bereich ist das Photodioden-Signal nicht mehr durch den Schalldruck moduliert, wie im Bereich rechts des Nullpunktes am Ausbleiben der Modulation entlang der Zeitachse zu erkennen ist. Es ist zu erwarten, dass die in <sup>(4)</sup> erläuterte Richtcharakteristik des Sensors beim hier vorliegenden schrägen Schalleinfall der Randbeugungswelle zusätzliche Effekte in diese Messung einbringt, deren Deutung noch aussteht.

### Zusammenfassung & Ausblick

Es wurde die automatisierte Messung von Schalldruckverteilungen auf einer Schnittlinie mittels eines interferenz-optischen Vielschichthydrophons dargestellt. Das Verfahren erlaubt die sekundenschnelle Erfassung des Schalldrucks auf einer Linie von bis zu 5 mm Länge, wobei Messpunkte im lateralen Abstand von weniger als 50 µm realisiert wurden. Die erreichbare Ortsauflösung ist im wesentlichen beugungsoptisch begrenzt und liegt deutlich unter 100 µm. Messungen über zweidimensionale Schnittflächen durch ein repetierendes Schallfeld werden durch Parallelverschiebung des Messaufbaus und nachträgliches Zusammenfügen der Einzellinien möglich. Erweiterungen des dargestellten Aufbaus auf ein serielles Raster-Scan-Verfahren sowie auf grossflächige stroboskopische Beleuchtung des Sensors und parallele Aufnahme der Reflexion mit einer CCD-Kamera sind in Planung.

<sup>1</sup> Wilkens, V.: Characterization of an optical multilayer hydrophon with constant frequency response in the range from 1 to 75 MHz, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 113, No. 3 (2003), pp. 1431-1438  
<sup>2</sup> Wilkens, V., Koch, Ch.: Optical multilayer detection array for fast ultrasonic field mapping, Optics Letters, Vol. 24, No. 15 (1999), pp. 1026-1028  
<sup>3</sup> Beard, P. C.: Photoacoustic imaging of blood vessel equivalent phantoms, Proc. SPIE Vol. 4618 (2002), pp. 54-62  
<sup>4</sup> Wilkens, V.: Charakterisierung eines optischen Interferenzschichthydrophons für die Anwendung als breitbandiges Referenzmesssystem, Fortschritte der Akustik DAGA 2002, pp. 722-723