

Optische Vielschichtsensoren: eine Alternative zu piezoelektrischen Ultraschallhydrophonen

V. Wilkens, Ch. Koch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig

1. Einleitung

Optische Sensoren stellen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen der Ultraschallmesstechnik eine wichtige Alternative zu piezoelektrischen Hydrophonen dar. Optisch-interferometrische Verfahren erlauben die präzise Messung des räumlichen und zeitlichen Schalldruckverlaufes in Wasser oder anderen Flüssigkeiten mit großer Frequenzbandbreite und mit hoher räumlicher Auflösung. Vorteile optischer Verfahren sind ferner die Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischer Einstrahlung und die erreichbaren hohen mechanischen Zerstörungsschwellen z. B. von Fasersensoren, so dass auch die Messung sehr hoher Schalldruckamplituden möglich ist. Die Verwendung eines dielektrischen optischen Vielschichtsystems als Messelement ermöglicht es, ein Interferometer in Form eines Mikroresonators am Messort zu konzentrieren [1,2,3]. Dieses Verfahren kommt im Vergleich zu anderen interferometrischen Messtechniken mit einem recht geringen apparativen Aufwand zur Bestimmung des Schalldruckverlaufes aus. In dem Beitrag werden Vielschichtsensoren unterschiedlicher Geometrie bezüglich ihrer akustischen Übertragungseigenschaften experimentell untersucht.

2. Messprinzip und Sensorvarianten

Das Funktionsprinzip der optischen Vielschichthydrophone basiert auf der elastischen Deformation eines Fabry-Perot Schichtsystems durch eine einfallende Schallwelle und der Detektion der dadurch erzeugten optischen Reflexionsgradänderung (Abb. 1). Die hier verwendeten Schichtsysteme bestehen aus insgesamt 19 Schichten mit alternierenden Brechzahlen $n = 2,30$ (Nb_2O_5) und $n = 1,48$ (SiO_2). Die Interferenzfilterstruktur, bestehend aus einer zentralen $\lambda/2$ Abstandsschicht und zwei hochreflektierenden Untersystemen, eignet sich besonders gut als druckempfindliches Element [2].

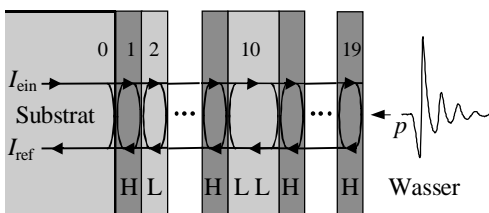


Abb. 1: Optisches Vielschichtsystem zur Ultraschalldruckmessung in Wasser; H: hochbrechende, L: niedrigbrechende $\lambda/4$ Schicht; I_{ein} : einfallende, I_{ref} : reflektierte Lichtintensität; p : Druckimpuls.

Die harten, gesputterten Schichten besitzen eine hohe Druckfestigkeit und können im Wasser eingesetzt werden, ohne dass es zu einem Aufquellen der Schichten kommt. Die Gesamtdicke des Systems beträgt nur etwa $1,9 \mu\text{m}$ und bleibt damit auch für Ultraschallfrequenzen von mehreren 100 MHz deutlich unter der akustischen Wellenlänge im Sensor. Das Schichtsystem kann in unterschiedlichen Sensorformen verwendet werden, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

A. Faseroptisches Vielschichthydrophon

Durch die Beschichtung der Stirnfläche eines Lichtwellenleiters (Außendurchmesser: $125 \mu\text{m}$) lässt sich ein Sondenhydrophon mit sehr geringen Abmessungen herstellen [2], das

minimal invasive Messungen mit hoher räumlicher Auflösung erlaubt. Der Aufbau zur Messung von Impulsen eines Breitbandwandlers ist in Abb. 2 dargestellt. Als Lichtquelle wird eine Laserdiode (680 nm, 30 mW) mit externem Resonator eingesetzt. Mit Hilfe eines in Littrow-Anordnung betriebenen Beugungsgitters kann die Laserwellenlänge auf den Arbeitspunkt des Sensors abgestimmt werden. Das Licht wird über einen Faraday-Isolator und einen Strahlteiler in einen Singlemode Lichtwellenleiter (Kerndurchmesser: $3,5 \mu\text{m}$) eingekoppelt. Der am Schichtsystem reflektierte Lichtanteil wird mit Hilfe einer Photodiode detektiert und das entstehende Signal mit einem Digitaloszilloskop dargestellt und gespeichert. Der Sensor befindet sich im Fokusbereich des Breitbandwandlers, der durch einen Impulsgenerator angeregt wird.

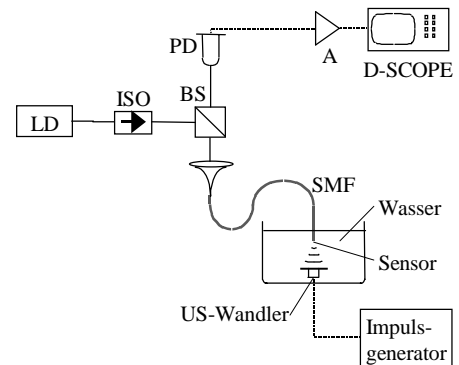


Abb. 2: Aufbau des faseroptischen Vielschichthydrophons zur Messung von Impulsen eines Breitbandwandlers; LD: Laserdiode; ISO: Opt. Isolator; BS.: Strahlteiler; SMF: Singlemode Faser; PD: Photodiode; A: Verstärker.

B. Vielschichtsensor Array

In diesem Fall wird das Schichtsystem auf ein Glassubstrat aufgebracht (hier: 25 mm Durchmesser, 6,5 mm Dicke) und die Reflexionsmodulation mittels eines freien, fokussierten Laserstrahls detektiert [3]. Die Spotgröße und -position des Laserstrahls definieren das effektive Sensorelement und durch Verschieben des Spots werden nacheinander die Elemente als Sensorarray abgetastet (Abb. 3).

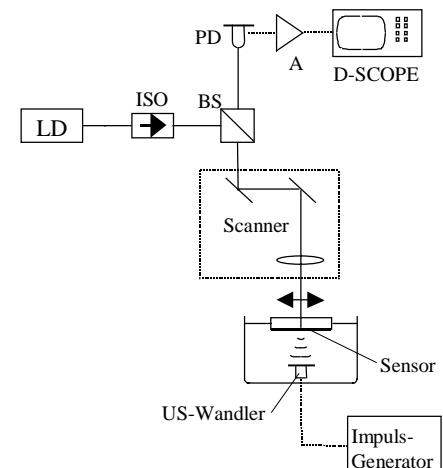


Abb. 3: Aufbau des 2-D Arrays für Impulsmessungen; Abkürzungen: vgl. Abb. 2.

Unter Verwendung optischer Scantechnik können auf diese Weise zweidimensionale Feldverteilungen sehr schnell gemessen werden, da im Gegensatz zum konventionellen Scannen mit Einzelelement-Hydrophonen wenige oder gar keine mechanischen Komponenten bewegt werden müssen.

C. Vielschichtsensor mit schrägem Lichteinfall

Für Punktmessungen kann der unter B. beschriebene Sensor auch unter schrägem Lichteinfall verwendet werden, so dass hin- und rücklaufender Lichtweg getrennt sind. Diese in Abb. 4 gezeigte Anordnung (im folgenden Flächensensor genannt) besitzt den Vorteil, dass nur sehr wenige optische Komponenten benötigt werden, da auf den optischen Isolator und den Strahlteiler verzichtet werden kann. Aufgrund der optimalen Lichtausnutzung kann schon mit einer relativ geringen Laserleistung (1,5 mW, Helium-Neon Laser) ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis erreicht werden und die Abstimmung auf den Arbeitspunkt des Sensors kann hier bei fester Laserwellenlänge durch Variation des Einfallswinkels α erfolgen.

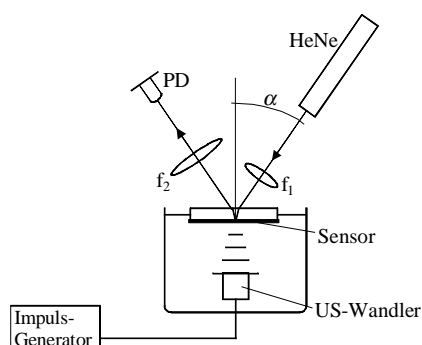


Abb. 4: Vielschichtsensor mit schrägem Lichteinfall.

3. Impulsmessungen und Übertragungseigenschaften

Mit den in 2.A und 2.C beschriebenen Systemen wurden Vergleichsmessungen unter Verwendung verschiedener fokussierender Breitbandwandler durchgeführt. Bei der Impulsanregung entstehen kurze Ultraschallimpulse, wie sie z. B. bei Impuls-Echo Diagnose Verfahren eingesetzt werden.

In Abb. 5 sind die Ergebnisse für ein Signal mit einer mittleren Frequenz von 4 MHz dargestellt. Man erkennt, dass der Zeitverlauf des Fasersensorsignals von dem des Flächensensors abweicht, es kommt im Wesentlichen zu einer Frequenzverschiebung. Die Ursache für diese Abweichung ist die am Fasersensor auftretende Randbeugung, die zu einer periodischen Variation der Übertragungsfunktion führt. Dieser Effekt tritt bei jedem Sondenhydrophon mehr oder weniger in Erscheinung und kann verhindert werden, wenn der Durchmesser des Empfängers die Ausdehnung des Schallfeldes überragt, wie es bei dem Flächensensor der Fall ist, oder wenn die akustische Impedanz des Empfängers an die des Wassers angepaßt ist. Wenn das Fasersensorsignal rechnerisch um den Einfluß der Randbeugungswelle korrigiert wird, erhält man eine gute Übereinstimmung (Abb. 5).

Die Messergebnisse für einen Impuls mit einer mittleren Frequenz von ~ 8 MHz sind in Abb. 6 dargestellt. Neben dem bereits erwähnten Effekt erkennt man in diesem Fall zusätzliche Oszillationen im Fasersensorsignal mit einer charakteristischen Frequenz von ~ 24 MHz. Diese Oszillationen sind auf interne Randwellen zurückzuführen, die beim Eintreffen des Impulses am Rand der Faser angeregt werden, nach innen laufen und ähnlich wie die Randbeugungswellen im Wasser mit einer bestimmten Zeitverzögerung am Faserkern

zum Sensorsignal beitragen. Im Gegensatz zur Randbeugungswelle im Wasser kommt es bei den internen Randwellen zu Reflexionen am gegenüberliegenden Faserrand und dadurch zu mehrfachen Umläufen, die eine Resonanzüberhöhung der Übertragungsfunktion bei ~ 24 MHz hervorrufen. Es wurde ein weiterer Sensor hergestellt, bei dem die Faser in eine Glaskapillare mit 1 mm Außendurchmesser eingeklebt ist. Dadurch lassen sich die Resonanzfrequenz und der Einfluß der Randwellen verändern und der Signalverlauf ist im Falle des 8 MHz Impulses weniger gestört (Abb. 6).

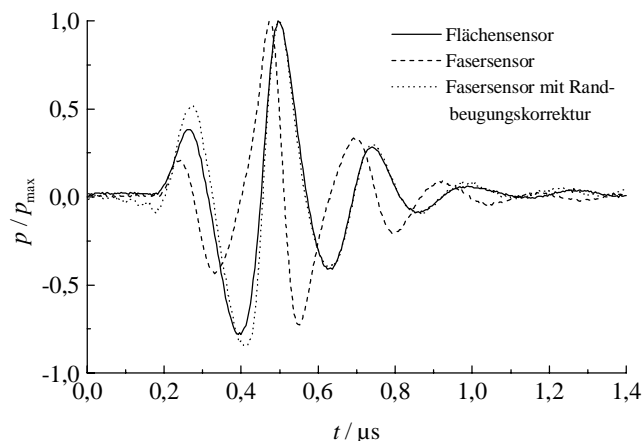


Abb. 5: Normierte Schalldruckverläufe, Impuls mit mittlerer Frequenz 4 MHz; Wandler: K. Deutsch, TS 20 P4 P30.

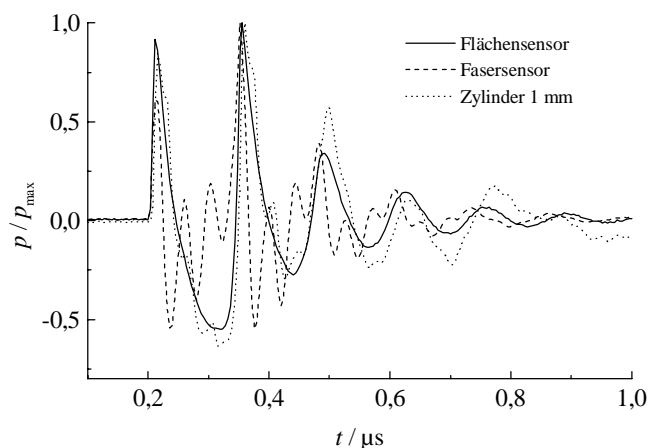


Abb. 6: Normierte Schalldruckverläufe, Impuls mit mittlerer Frequenz 8 MHz; Wandler: K. Deutsch, TS6 PB 4-20 P15.

4. Zusammenfassung

Es wurden optische Vielschichtsensoren vorgestellt, die in unterschiedlicher Form als Hydrophone mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung eingesetzt werden können. Die Übertragungseigenschaften der unterschiedlichen Systeme wurden anhand von Impulsmessungen verglichen. Während die erhaltenen Signale der faseroptischen Messsonden stark durch Randbeugungswellen im Wasser und durch interne Randwellen in den Empfängeroberflächen beeinflusst werden, ergeben sich für den Flächensensor keine Störungen durch derartige Randeffekte, da die Oberfläche dieses Empfängers die laterale Ausdehnung des fokussierten Schallfeldes überragt.

5. Literatur

- [1] Koch, Ch.: „Coated fiber-optic hydrophon for ultrasonic measurement“, Ultrasonics 34 (1996) 687-689.
- [2] Wilkens, V., Koch, Ch.: “Fiber-optic multilayer hydrophone for ultrasonic measurement“, Ultrasonics 37 (1999) 45-49.
- [3] Wilkens, V., Koch, Ch.: “Optical multilayer detection array for fast ultrasonic field mapping“, Opt. Lett. 24 (1999) 1026-1028