

Übertragungseigenschaften optischer Interferenzschichthydrophone

V. Wilkens, W. Weise, W. Molkenstruck, Ch. Koch

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

1. Einleitung

Optische Sensorik kann vorteilhaft zur zeitlich und räumlich hochauflösenden Messung von Ultraschallfeldern eingesetzt werden. Messsysteme, die als Sensorelement dielektrische optische Interferenzschichtsysteme auf Lichtwellenleiterstirnflächen [1] bzw. auf größeren Glassubstraten verwenden [2], bieten eine gute Empfindlichkeit und kommen gleichzeitig mit einem recht geringen apparativen Aufwand zur Bestimmung des Schalldruckverlaufs aus. Im vorliegenden Beitrag werden experimentelle und theoretische Untersuchungen zum frequenzabhängigen Übertragungsverhalten der faseroptischen Interferenzschichthydrophone vorgestellt. Mithilfe eines primären optischen Kalibrierverfahrens wurde die Übertragungsfunktion im Frequenzbereich von 5 bis 45 MHz experimentell bestimmt. Das Ergebnis wird verglichen mit der theoretischen Übertragungsfunktion aus einer numerischen Rechnung, die die Wechselwirkung zwischen Schallfeld und Empfänger mithilfe von Finite-Elemente-Methoden simuliert.

2. Messprinzip der Interferenzschichthydrophone

Das Funktionsprinzip der optischen Vielschichthydrophone basiert auf der elastischen Deformation eines dielektrischen Schichtsystems durch eine einfallende Schallwelle und der Detektion der dadurch erzeugten optischen Reflexionsgradänderung (Abb. 1). Die verwendeten Schichtsysteme bestehen aus insgesamt 19 Schichten mit alternierenden Brechzahlen $n = 2,30$ (Nb_2O_5) und $n = 1,48$ (SiO_2). Die Struktur eines Interferenzfilters, bestehend aus einer zentralen $\lambda/2$ Abstandsschicht (λ : Lichtwellenlänge) und zwei hochreflektierenden Untersystemen, eignet sich besonders gut als druckempfindliches Element [1]. Durch die Beschichtung der Stirnfläche eines Lichtwellenleiters (Außendurchmesser: $125 \mu\text{m}$) lässt sich ein Sondenhydrophon mit sehr geringen Abmessungen herstellen, das Messungen mit hoher lateraler Auflösung und geringer Störung des Messvolumens erlaubt.

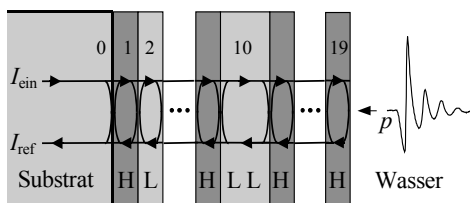


Abb. 1: Optisches Interferenzschichtsystem zur Ultraschalldruckmessung in Wasser; H: hochbrechende, L: niedrigbrechende $\lambda/4$ Schicht; I_{ein} : einfallende, I_{ref} : reflektierte Lichtintensität; p : Druckimpuls.

3. Experimentelle Bestimmung der Übertragungsfunktion

Das verwendete optische Kalibrierverfahren beruht auf der interferometrischen Messung der Auslenkung einer dünnen Folie, an der das Schallfeld eines fokussierenden breitbandigen PVDF-Sendewandlers reflektiert wird (Abb. 2 A) [3]. Durch Vergleich mit der HeNe-Laserwellenlänge wird die Teilchenverschiebung im Fokus der Ultraschallwelle ermittelt und daraus die Schalldruckamplitude berechnet. Es werden nacheinander Tonbursts verschiedener diskreter Frequenzen er-

zeugt. Anschließend werden die auf diese Weise charakterisierten Schallfelder bei gleichen Anregungsbedingungen mit dem zu kalibrierenden faseroptischen Interferenzschichthydrophon vermessen (Abb. 2 B). Als Lichtquelle wird im Fall des Interferenzschichtsystems eine Laserdiode (680 nm, 20 mW) mit externem Resonator (ECLD) eingesetzt, so dass mithilfe eines Beugungsgitters die Laserwellenlänge auf den Arbeitspunkt des Sensors abgestimmt werden kann. 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 einer Photodiode detektiert und das entstehende Signal mit einem Digitalzilloskop dargestellt und gespeichert. Durch Vergleich mit der Referenz wird die Übertragungsfunktion des Interferenzschichtsystems bestimmt.

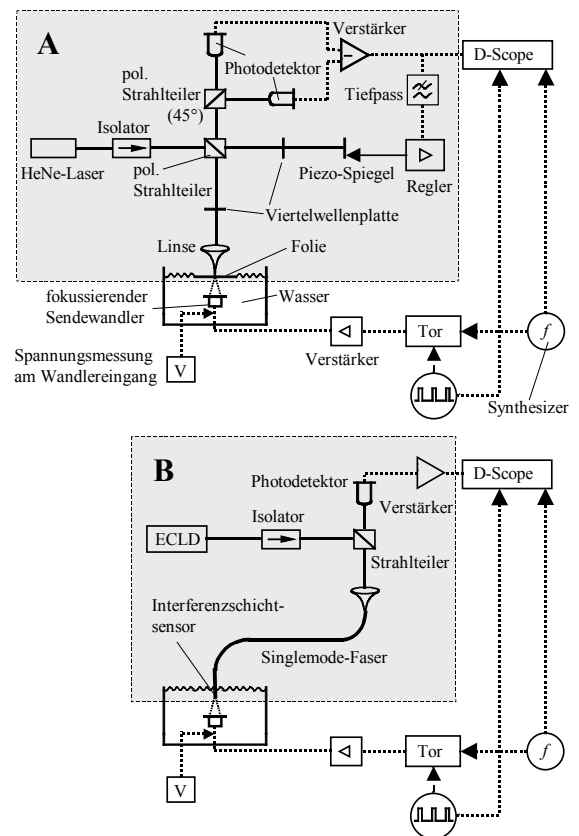


Abb. 2: Interferometrisches Kalibrierverfahren; A: Vermessung des Schallfeldes durch Bestimmung der Folienauslenkung mithilfe eines stabilisierten Michelson-Interferometers; B: Messung des gleichen Schallfeldes mit dem zu kalibrierenden faseroptischen Interferenzschichthydrophon; die auszutauschenden Empfängersysteme sind grau unterlegt.

Das Ergebnis der Kalibriermessung zeigt eine starke Frequenzabhängigkeit der Übertragungsfunktion (Abb. 3). Man erkennt deutlich ein Resonanzverhalten des faseroptischen Interferenzschichtsystems. Bei 24 MHz ist der Übertragungsfaktor fast fünfmal so groß wie außerhalb dieser Überhöhung bei 15 bzw. 30 MHz. Abgesehen von der starken Resonanzüberhöhung ist die Übertragungsfunktion durch eine „Grundwelligkeit“ und eine Abnahme bei kleinen Frequenzen geprägt.

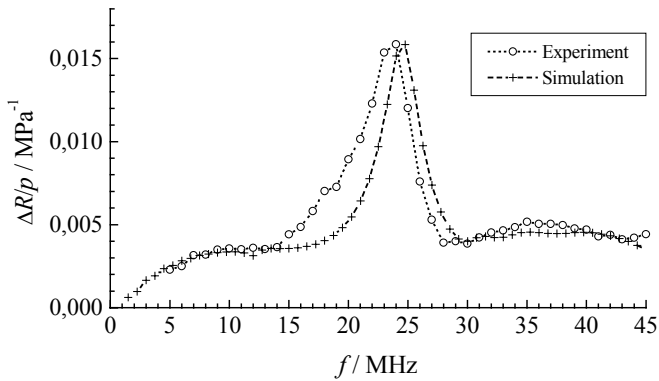


Abb. 3: Amplitude der Übertragungsfunktion des faseroptischen Interferenzschichthydrophons.

4. Finite-Elemente-Simulationen

Zur theoretischen Analyse der Wechselwirkung zwischen einfallender Schallwelle und Faserende wurden Simulationen mithilfe von Finite-Elemente-Methoden (FEM) durchgeführt. Die Simulationen erfolgten im Zeitbereich, d. h. es wurde die Impulsantwort des Fasersensors bestimmt. Diese Vorgehensweise besitzt im Vergleich zu Simulationen im Frequenzraum den Vorteil, dass die verschiedenen, zeitlich nacheinander auftretenden Wechselwirkungseffekte deutlich getrennt sichtbar und interpretierbar werden. Weiterhin können die Randbedingungen innerhalb der laufenden Simulation sowohl räumlich als auch zeitlich sehr wirkungsvoll verändert werden, um z. B. Reflexionen an der Berandung des Modells möglichst zu eliminieren.

Die Geometrie des verwendeten Modells ist in Abb. 4 mit den Angaben für die typischen Abmessungen dargestellt. Das Modell ist radialsymmetrisch zur z -Achse aufgebaut, die entlang der Fasermittelachse verläuft. In Abb. 4 ist also die Hälfte des Querschnitts entlang der Faserachse dargestellt. Die Faser ist vor der Stirnfläche und seitlich von Wasser umgeben. Insgesamt besitzt die Struktur ca. 125000 Elemente. Am unteren Bildrand befindet sich der anregende Schwingerfläch, die einen Schalldruckimpuls im Wasser mit gaußförmigem Zeitverlauf erzeugt. Um eine gute zeitliche Auflösung der Effekte zu erreichen, werden sehr kurze Impulslängen (volle Breite beim $1/e$ -fachen Wert des Maximums) von ca. 2 ns verwendet. Nach Aussenden des Impulses wird die akustische Admittanz der unteren Grenzfläche auf den Wert von Wasser geändert. Dadurch werden später auftretende Rückreflexe vermindert und führen in der weiteren Zeitentwicklung nicht zu Störungen. In der hinteren Hälfte der Faser ist eine zeitlich konstante, in z -Richtung zunehmende akustische Absorption realisiert, damit Reflexionen an der Rückseite der Faser keine Störungen im vorderen Bereich hervorrufen.

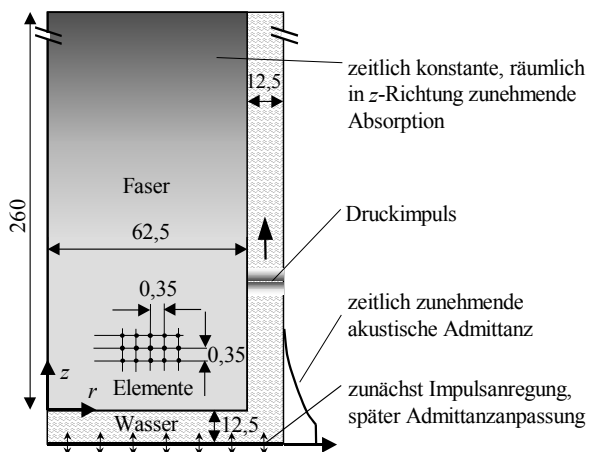


Abb. 4: Typische Modellgeometrie für die Simulation; Abmessungen in μm .

Zur quantitativen Auswertung werden aus den Verschiebungsdaten im Bereich des Faserkerns an der Stirnfläche die Dehnungen in axialer und radialer Richtung sowie die Brechzahländerungen aufgrund des dehnungsoptischen Effektes berechnet. Zusammen mit dem Druckverlauf im Wasser vor der Stirnfläche kann daraus mithilfe der Theorie für optische Schichtsysteme die Antwortfunktion in Form der Reflexionsgradänderung $\Delta R(t)$ bestimmt werden [4]. Die theoretische Übertragungsfunktion ergibt sich dann durch numerische Fouriertransformation der Antwortfunktion und Division durch das Frequenzspektrum des anregenden Druckimpulses.

Die ermittelte Übertragungsfunktion ist in Abb. 3 dargestellt. Die experimentell gefundenen Eigenschaften werden durch die Simulation bestätigt und man erkennt eine im Rahmen der Mess- und Simulationsunsicherheiten gute Übereinstimmung. Die leichte Verschiebung des Resonanzpeaks liegt vermutlich in den Annahmen für die elastischen Parameter der gesputterten Schichten begründet. Hervorgerufen wird die starke Überhöhung durch das charakteristische Nachschwingverhalten des Faserendes. Zur Verdeutlichung sind in Abb. 5 zwei Zustände dieser das Sensorverhalten besonders stark beeinflussenden Schwingung dargestellt.

Die Ursache für die Abweichung der Übertragungsfunktion im Bereich 15-22 MHz (vgl. Abb. 3) wird in einem zu geringen Wasservolumen seitlich der Faser im Modell vermutet. Weitere Effekte wie Randbeugung und Festkörperwandwellen konnten in den Simulationsergebnissen identifiziert und deren Einfluss auf das Übertragungsverhalten untersucht werden [4]. Die sich vom Faserrand nach innen ausbreitende Rayleighwelle erzeugt vor allem die Abnahme bei niedrigen Frequenzen und im Bereich um 50 MHz, während die sich im Wasser ausbreitende Randbeugungswelle eine Modulation der Übertragungsfunktion mit einem ersten Maximum bei ca. 12 MHz hervorruft.

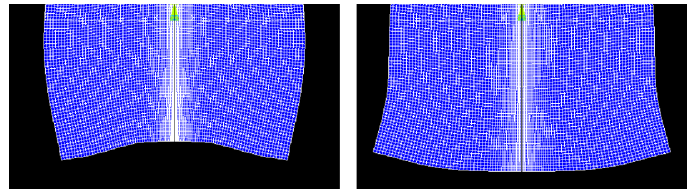


Abb. 5: Schwingungsform der Stabwellen-Endresonanz am Faserende (Linienverdichtung in der Mitte aufgrund der Diskretisierung des Modells).

5. Zusammenfassung

Die Übertragungsfunktion des faseroptischen Interferenzschichthydrophons wurde experimentell ermittelt und mit dem Ergebnis einer numerischen Simulation verglichen. Es ergaben sich eine gute Übereinstimmung und ein Einblick in die Wechselwirkungsprozesse am Faserende. Die Ursache für die starke Resonanzüberhöhung wurde im Eigenschwingverhalten des Faserendes im Wasser gefunden. Mithilfe der Übertragungsfunktion des Sensors kann auf effektive Weise eine Messwertkorrektur vorgenommen werden [4]. Dies ermöglicht die korrekte Bestimmung des zeitlichen Schalldruckverlaufs auch im Fall sehr breitbandiger Ultraschallimpulse, was die Anwendungsmöglichkeiten des Sensors erheblich erweitert.

Literatur

- [1] Wilkens, V., Koch, Ch.: „Fiber-optic multilayer hydrophone for ultrasonic measurement“, *Ultrasonics* 37 (1999) 45-49.
- [2] Wilkens, V., Koch, Ch.: „Optical multilayer detection array for fast ultrasonic field mapping“, *Opt. Lett.* 24 (1999) 1026-1028.
- [3] Koch, Ch., Molkenstruck, W.: „Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry“, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* 46, 1303-1314 (1999).
- [4] Wilkens, V.: „Dielektrische optische Interferenzschichthydrophone zur zeitlich und räumlich hochauflösenden Messung von Ultraschallfeldern“, Dissertation, Universität Oldenburg (2001), eingereicht.