Charakterisierung eines optischen Interferenzschichthydrophons für die Anwendung als breitbandiges Referenzmesssystem

Volker Wilkens

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

1. Einleitung

Optische Hydrophone, die als empfindliches Element ein dielektrisches optisches Interferenzschichtsystem verwenden, können vorteilhaft zur zeitlich und räumlich hochauflösenden Messung von Ultraschallfeldern eingesetzt werden. Das Messprinzip beruht auf der elastischen Deformation des als Mikrointerferometer wirkenden Schichtsystems durch eine einfallende Schallwelle und der Detektion der dabei erzeugten optischen Reflexionsgradmodulation [1], [2].

Im vorliegenden Beitrag wird ein Messaufbau diskutiert, bei dem sich das Schichtsystem mit einer Dicke von weniger als 2 µm auf einer Glasplanplatte mit 25 mm Durchmesser befindet und die Reflexionsgradänderung durch einen rückwärtig auf das Schichtsystem treffenden Laserstrahl detektiert wird. Bei nicht senkrechter Lichteinstrahlung auf das Schichtsystem ergibt sich eine besonders einfache, effiziente und robuste optische Detektionsanordnung.

2. Messprinzip und Aufbau des Interferenzschicht-hydrophons

Das Sensorelement des hier verwendeten optischen Interferenz-schichthydrophons besteht aus einem dielektrischen Schicht-system mit insgesamt $N = 19$ Schichten mit alternierenden Brechzahlen $n = 2{,}30$ (Nb_2O_5) und $n = 1{,}48$ (SiO_2) (Abb. 1, Ausschnittsvergrößerung). Die Struktur eines Interferenzfilters, bestehend aus einer zentralen $\lambda_D/2$ Abstandsschicht (λ_D: Designwellenlänge, bei der das Interferenzfilter bei senk-rechtem Lichteinfall maximale Lichttransmission aufweist) und zwei hochreflektierenden Untersystemen, eignet sich besonders gut als druckempfindliches Element [1], [3]. Bei geringer Gesamtdicke des Sensorelementes wird eine hohe optische Finesse erreicht. Eine einfallende Schalldruckwelle p_{ein} verändert die optischen Schichtdicken und damit den optischen Reflexionsgrad $R = I_{ref} / I_{ein}$ des Systems (I_{ref}: reflektierte, I_{ein}: einfallende Lichtintensität). Die Reflexionsgradänderung ΔR wird durch eine optische Detektionsanordnung gemessen.

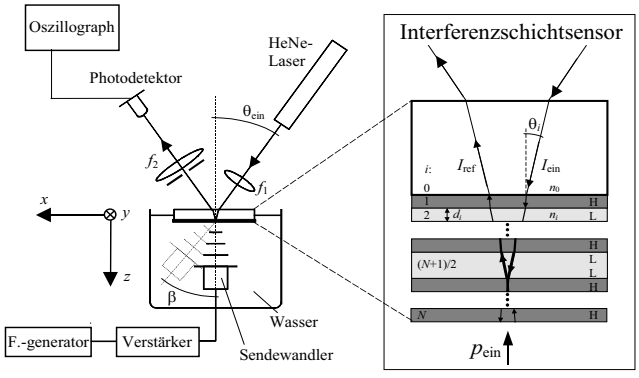

Abb. 1: Optisches Interferenzschichthydrophon zur Ultraschalldruckmessung; Abstimmung auf den Arbeitspunkt durch den Lichteinfallswinkel θ_{ein}; zur Vermessung der Richtcharakteristik Schwenken des Sendewandlers (vgl. Kap. 4); Ausschnittvergrößerung: Sensorschichtsystem auf Glasplanplatte; H: hochbrechende, L: niedrigbrechende $\lambda/4$ Schicht; I_{ein}: einfallende, I_{ref}: reflektierte Lichtintensität; p_{ein}: einfallende Schalldruckwelle.

Der Arbeitspunkt maximaler Reflexionsgradänderung pro einfallender Schalldruckamplitude $\Delta R / p_{ein}$ liegt an der Kante des spektralen Transmissionspeaks bei ca. $R = 0{,}25$ (für den Fall eines kollimierten Lichtbündels) und wird durch die geeignete Wahl des Verhältnisses von Designwellenlänge λ_D zur Lichtwellenlänge λ des eingesetzten Lasers eingestellt (Abb. 2). Bei vorgegebener Lichtwellenlänge, wie im Fall des verwendeten Helium-Neon Lasers, kann eine exakte Abstimmung auf das vorhandene Schichtsystem über den Lichteinfallswinkel θ_{ein} erfolgen, da die optischen Phasen-dicken der Schichten winkelabhängig sind und sich daher auch das Verhältnis λ_D / λ am Arbeitspunkt bei Variation von θ_{ein} ändert. Aufgrund der Winkelabhängigkeit der Fresnel-koeffizienten erhöht sich außerdem die Finesse und damit auch $\Delta R / p_{ein}$ mit zunehmendem Winkel θ_{ein} für senkrecht zur Einfallsebene polarisiertes Licht (s-Pol.), während es zu einer Verminderung für parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht (p-Pol.) kommt [3]. Im hier untersuchten Aufbau beträgt der Lichteinfallswinkel $\theta_{ein} \approx 35°$ und es wird s-Pol. verwendet.

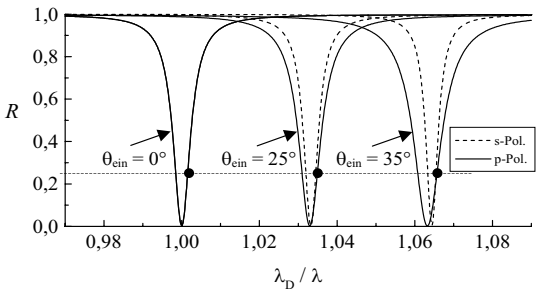

Abb. 2: Opt. Reflexionsgradverläufe für 19-Schicht-Interferenzfiltersysteme für drei verschiedene Lichteinfallswinkel θ_{ein} für p- und s-Polarisation (ebene Lichtwellen angenommen); Arbeitspunkte mit maximalem $\Delta R / p_{ein}$ (•).

Gegenüber einer Detektionsanordnung mit senkrechtem Licht-einfall [2] besitzt die in Abb. 1 gezeigte Detektionsanordnung neben der erwähnten Abstimmbarkeit den Vorteil, dass hin- und rücklaufender Lichtweg getrennt sind. Dadurch kommt diese Anordnung mit einem Minimum an optischen Bauteilen aus, da der sonst notwendige optische Isolator und der Strahlteiler entfallen. Neben dem Sensorelement werden nur zwei Linsen, eine Lichtquelle und ein Photodetektor benötigt. Optische Reflexionen an der Rückseite der Glasplanplatte sind bei dieser Anordnung räumlich vom am Schichtsystem reflektierten Licht getrennt und können auf einfache Weise ausgeblendet werden. Aufgrund der optimalen Lichtausnutzung kann schon mit einer geringen Laserleistung (hier ca. 2 mW) eine gute Empfindlichkeit erreicht werden (ohne Mittelung: $p_{min} \approx 30$ kPa in 25 MHz Bandbreite). Mithilfe einer Linse ($f_1 = 50$ mm) wird der Laserstrahl auf das Schichtsystem fo-kussiert, so dass eine hohe laterale Auflösung ermöglicht wird.

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 (Durchmesser: 5 mm, Brennweite: 12,5 mm) reflektiert wird [4]. Es werden nacheinander Tonbursts verschiedener diskreter Frequenzen angeregt. Durch Vergleich mit der Laserwellenlänge wird die Teilchenverschiebung im Fokus der Ultraschallwelle ermittelt und daraus die Schalldruckamplitude p_{ein} berechnet. Anschließend werden die auf diese Weise charakterisierten Schallfelder bei gleichen Anregungsbedingungen mit dem zu kalibrierenden Interferenzschichthydrophon vermessen. Durch Vergleich der gemessenen Signalspannungen U mit der Referenzmessung wird die Übertragungsfunktion $M(f) = U / p_{ein}$ bestimmt.

Das Ergebnis der Messung ist in Abb. 3 dargestellt, wobei eine Korrektur für den separat vermessenen Frequenzgang des Photodetektors vorgenommen wurde. Es ergibt sich im Rahmen der Messunsicherheiten eine glatte und konstante Übertragungsfunktion im gesamten untersuchten Frequenzbereich von 1 bis 75 MHz. Aufgrund der geringen Dicke des Sensorelementes treten keine Dickenresonanzeffekte auf, wie sie z. B. typischerweise bei piezoelektrischen PVDF-Membranhydrophonen als Überhöhungen im Bereich um 40 MHz (bei einer typ. Foliendicke von 25 µm, coplanar) beobachtet werden [4]. Da der Träger des Sensorelementes (Glasplanplatte) die radiale Schallfeldausdehnung überragt, wird die Übertragungsfunktion des optischen Interferenzschichthydrophons im Gegensatz zu derjenigen von Nadelhydrophonen [5] oder von Faserendensensoren [6] auch nicht durch Randbeugungseffekte und radiale Resonanzen beeinflusst.

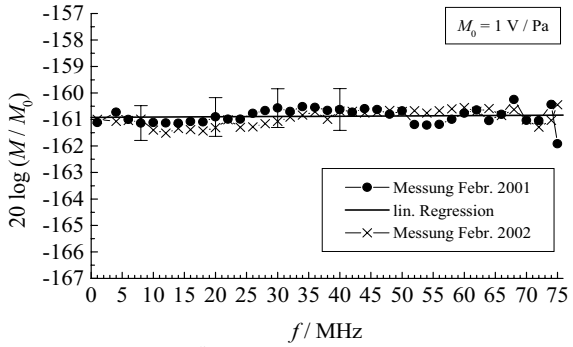

Abb. 3: Amplitude der Übertragungsfunktion des optischen Interferenzschichthydrophons (wiederholte Messung; einfache Standardunsicherheiten).

4. Richtcharakteristik

Zur Bestimmung der Empfangsrichtcharakteristik wurde eine Mechanik konstruiert, welche das Schwenken eines fokussierenden Sendewandlers (Durchmesser: 6 mm, Brennweite 20 mm) um den Messpunkt an der Wasseroberfläche ermöglicht, da die ansonsten einfachere Drehung des Hydrophons in diesem Fall nicht möglich ist (Abb. 1). Es wurde für verschiedene Ultraschallfrequenzen jeweils die Amplitude eines Tonbursts in Winkelabständen von 2° gemessen und auf den Wert bei senkrechter Einschallung bezogen. Nacheinander wurden Messungen für die *xz*-Ebene und die *yz*-Ebene durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt. Während bei Membranhydrophonen die Richtcharakteristik gut durch die Beugungstheorie für einen starren Kreisscheibenempfänger beschrieben wird, wenn man von dem Einfluss von Lambwellen bei großen Einfallswinkeln (ca. 55°) absieht [7], ergibt sich für das optische Interferenzschichthydrophon ein komplett anderes Verhalten. Im untersuchten Frequenz- und Winkelbereich tritt keine signifikante beugungsbedingte Frequenzabhängigkeit auf. Dominierend ist stattdessen der Einfluss von Rayleighwellen, die starke Überhöhungen hervorrufen. Im Bereich 22°-28° werden die Oberflächenwellen bei vorliegender Spuranpassung besonders stark angeregt. Für die *xz*-Ebene ergibt sich eine Asymmetrie aufgrund der Beleuchtungswinkelabhängigkeit von $\Delta R / p_{ein}$ in Verbindung mit der Verwendung eines fokussierten Lichtbündels unter nicht senkrechtem Lichteinfall.

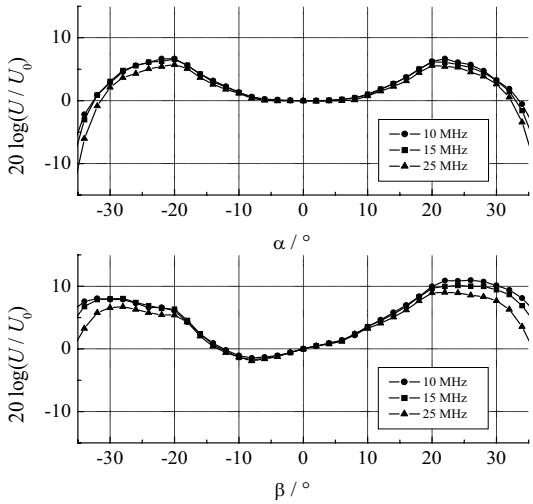

Abb. 4: Richtcharakteristik des optischen Interferenzschichthydrophons senkrecht (oben, *yz*-Ebene, α) und parallel (unten, *xz*-Ebene, β) zur Lichteinfallsebene für verschiedene Ultraschallfrequenzen.

5. Zusammenfassung

Es wurde eine experimentelle Charakterisierung eines optischen Interferenzschichthydrophons vorgenommen, welches sich durch eine besonders einfache optische Detektionsanordnung auszeichnet. Dazu gehören die Bestimmung der akustischen Übertragungsfunktion im Frequenzbereich von 1 bis 75 MHz durch primäre Kalibrierung und die Untersuchung der Empfangsrichtcharakteristik. Im Vergleich zu konventionellen Membranhydrophonen ergeben sich dabei konstruktionsbedingt einige Besonderheiten.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Interferenzschichthydrophon vor allem aufgrund der in einem weiten Frequenzbereich konstanten Übertragungsfunktion für die Anwendung in Substitutionskalibrierverfahren besonders geeignet ist. Durch Impulskalibrierungen mit dieser Referenz kann auf einfache Weise die komplexe Übertragungsfunktion von Hydrophonen und Glasfasersensoren breitbandig bestimmt werden [3]. Dabei muss beachtet werden, dass die verwendeten Ultraschallbündel eine nicht zu starke Divergenz aufweisen, um durch die Empfangsrichtcharakteristik bedingte Fehler möglichst gering zu halten.

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] Wilkens, V.: „Dielektrische optische Interferenzschichthydrophone zur zeitlich und räumlich hochauflösenden Messung von Ultraschallfeldern“, Dissertation, Universität Oldenburg, PTB-Bericht PTB-MA-67 (2001).

[4] Koch, Ch., Molkenstruck, W.: „Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry“, IEEE Trans. Ulltrason., Ferroelect., Freq. Contr. 46, 1303-1314 (1999).

[5] Fay, B., Ludwig, G., Lankjaer, C., Lewin, P. A.: „Frequency response of PVDF needle-type hydrophones“, Ultrasound Med. Biol. 20, 361-366 (1994).

[6] Weise, W., Wilkens, V., Koch, Ch.: „Frequency response of fiber-optic multilayer hydrophones: Experimental investigation and finite element simulation“, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., im Druck.

[7] Robinson, S., Preston, R., Smith, M., Millar, C.: „PVDF reference hydrophone development in the UK – from fabrication and lamination to use as secondary standards“, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. 47, 1336-1344 (2000).