# OPTISCHES SONDENHYDROPHON FÜR ULTRASCHALL- UND STOSSWELLENMESSUNGEN MIT EINEM MESSBEREICH VON 0.1 BAR BIS 1000 BAR

J. Staudenraus, W. Eisenmenger

1. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart

## 1. Einführung

Das optische Sondenhydrophon /1/ wurde ursprünglich zur Erfassung fokussierter Druck- und Stoßwellenpulse in Wasser mit Amplituden zwischen 10 und 1000 bar entwickelt. Als Hydrophonprinzip dient die lokale Messung der akustisch induzierten Änderung des optischen Brechungsindex. Dazu wird das Ende eines Lichtleiters in das Schallfeld eingeführt und der zeitliche Intensitätsverlauf des am Lichtleiterende reflektierten Lichtes photoelektrisch registriert. Die derzeit realisierte Hydrophonanordnung /2/ besitzt eine Bandbreite von 20 MHz bei einer durch den Kerndurchmesser der eingesetzten Glasfaser gegebenen Ortsauflösung von 100 µm.

Durch Umhüllung der Glasfaserspitze mit geeigneten Elastomeren wird die Empfindlichkeit des Hydrophons erhöht und dadurch der bisher vorwiegend piezoelektrischen Hydrophonen vorbehaltene Meßbereich 0.1 bis 10 bar erschlossen. Auf ihre Verwendbarkeit geprüft wurden handelsübliche, essigsäurevernetzende 1-Komponenten-Silikon-Dichtmassen sowie ein entsprechendes Polyurethan-Produkt. Durch Eintauchen der Glasfaser in die Dichtmasse entstehen blasenfreie, gummielastische Schichten der Stärke 50 - 500 µm.

## 2. Theorie

Die Lichtreflexion an der Glasfaserendfläche ist über den Brechungsindex-Dichte-Zusammenhang mit der Druckamplitude verknüpft. Aufgrund der geringen Kompressibilität von Quarzglas überwiegt hierbei die druckbedingte Brechungsindexänderung des Elastomers. Die Brechungsindexänderung der angekoppelten Flüssigkeit bleibt im Fall opaker Elastomere ohne Einfluß, im Fall transparenter Elastomere in der Regel vernachlässigbar. Aufgrund der geringen Schichtdicke stellt sich im Elastomer der Schallwechseldruck p der Flüssigkeit mit einer Zeitkonstante von wenigen 100 ns ein. Den Zusammenhang zwischen Reflexionskoeffizient R und p findet män durch Kombination der Fresnelschen Formeln, der Lorentz-Lorenz-Beziehung sowie der elastischen Eigenschaften der Beschichtung. Für die Lichtreflexion am Faserende gilt

 $R(p) \approx [n_{K} - n(p)]^{2} / [n_{K} + n(p)]^{2};$  n<sub>K</sub>, n: Brechzahl Faserkern, Elastomer (1) Die Lorentz-Lorenz-Beziehung lautet

 $[n(p)^{2}-1]/[n(p)^{2}+2] = \rho(p) \cdot \text{const.}; \quad \rho: \text{ Dichte Elastomer}$ (2)

In erster Näherung reduziert sich die Deformation der Elastomerschicht im ebenen Schallfeld auf eine lineare eindimensionale Dehnung in Schallausbreitungsrichtung. Als Beziehung zwischen Schallwechseldruck p und Dichteänderung  $\Delta \rho$  im Elastomer folgt:

$$p = (\lambda + 2\mu) \cdot \Delta \rho / \rho_0 \tag{3}$$

Die an dieser Stelle eingehende Kombination der Lamé-Konstanten  $\lambda + 2\mu$  ist durch die Dichte  $\rho_0$  und die Phasengeschwindigkeit  $c_0$  der Longitudinalwelle gegeben:  $c_0 = [(\lambda + 2\mu)/\rho_0]^{1/2}$  (4)

### 3. transparente Elastomere

Für die folgenden Versuche wurde die Glasfaser zunächst mit einer farblosen, milchig-transparent vernetzenden Silikondichtmasse dünn beschichtet. In Tabelle 1 sind die gemessenen akustischen und optischen Daten zusammengefaßt.

Die akustische Sprung- bzw. Rechteckimpulsantwort des Hydrophons wurde (bei senkrecht zur Wellenfront ausgerichteter Faser) mittels einer piezoelektrischen Kontrollschallquelle aufgezeichnet und durch Messung rein elektrischer Größen die Schalldruckamplitude bestimmt /3/. Abgesehen von einer aufgrund schallharter Reflexion hoher Frequenzkomponenten auftretenden, innerhalb der ersten 80 ns abklingenden Signalüberhöhung /4/ gibt der Signalverlauf (Bild 1) den akustisch abgestrahlten Rechteckwellenzug der Amplitude 0.35 bar weitgehend unverzerrt wieder.

		 	-	h	Γ	Γ		Г	T			~
┣ <b>─</b>	$\square$	_		H					F	$\vdash$	$\vdash$	

Bild 1:Rechteckimpulsantwort silikonbeschichtetes Hydrophon, gemittelt über64 Pulse; digital tiefpassgefiltert (10 MHz);0.5 bar/Skt., 500 ns/Skt.;links: "transparent 100 μm"rechts: "weiß 400 μm"

Die nichtlinearen Eigenschaften des silikonbeschichteten Hydrophons wurden im Schallfeld eines elektromagnetischen Kalottenstrahlers /2,5/ untersucht. Dazu wurden die Drucksignale bei zunehmender Sendeamplitude 40 mm von der Senderoberfläche entfernt auf der Senderachse aufgezeichnet. Bild 2 zeigt den akustisch abgestrahlten Druckpuls, dem verzögert die vom Rand des Strahlers ausgehende Beugungswelle in Gestalt eines Unterdruckpulses folgt. Die beobachteten Überdruck- und Unterdruckamplituden sind proportional zum Quadrat der Generatorladespannung /2/ und wurden mittels kalibriertem PVDF-Nadelhydrophon bestimmt /4/. Bei niedrigen Druck- und Unterdruckamplituden (0.35 bar) liegt die in Bild 3 aufgetragene Empfindlichkeit etwa 20% über dem nach Gl.(1)-(4) aus Brechungsindizes, Dichte und Schallgeschwindigkeit berechneten Wert. Möglicherweise ist hierfür die in der Rechnung nicht berücksichtigte zusätzliche Kompression des Elastomers senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung oder eine an der Grenzfläche zur Faser erhöhte Kompressibilität verantwortlich.

Mit wachsender Amplitude zeigt die gemessene Empfindlichkeit sowohl im Überdruck- als auch im Unterdruckbereich ein stark nichtlineares Verhalten. Die berechnete Kurve demgegenüber setzt nach Gl.(3) eine lineare Beziehung zwischen Schallwechseldruck und Dichte voraus. Merkliche Verzerrungen des Unterdrucksignalanteils, bedingt durch an der Silikonoberfläche einsetzende Kavitation, treten ab -70 bar auf. Das hier beschriebene, ausgeprägt nichtlineare Verhalten wird an der Grenzfläche Wasser-Quarzglas nicht beobachtet.



Bild 2: Drucksignale auf der Achse eines elektromagnet. Kalottenstrahlers, Senderabstand 40 mm. oben: PVDF-Nadelhydrophon, unten: opt. Sondenhydrophon mit transp. Silikonüberzug; 41 bar/Skt., 5 μs/Skt.



<u>Bild 3</u>: Empfindlichkeit optisches Sondenhydrophon mit transparentem Silikonelastomerüberzug

### 4. opake Elastomere

a.) Polyurethan "schwarz", Silikon "schwarz"

Das eingesetzte Polyurethan besitzt im Unterschied zum Silikon einen etwas höheren Brechungsindex als das Glasfasermaterial. Bei Kompression der Polyurethanschicht nimmt daher der Brechzahlunterschied und damit die Lichtreflexion am Glasfaserende zu. Die berechneten Empfindlichkeiten weichen auch hier gegenüber den in Tabelle 1 angegebenen Meßwerten um 18 bzw. 25% nach unten ab. Eine Beschichtung der Faser mit weiß pigmentiertem bzw. mit Aluminiumstaub gefülltem Silikonelastomer liefert die höchsten bisher beobachteten Empfindlichkeiten. Sie lassen sich durch die Brechungsindex-Dichte-Beziehung Gl. (2) nicht erklären. Vielmehr wird im Ultraschallfeld durch Auslenkung der im Elastomer verteilten Partikel die Intensität des in die Faser zurückgestreuten Lichtes moduliert. Der zufälligen Verteilung der Partikel entsprechend variiert die gemessene Empfindlichkeit beträchtlich, für das weiß pigmentierte Silikon zwischen  $+3.6 \cdot 10^{-3}$ /bar und  $-3.6 \cdot 10^{-3}$ /bar. Dieser Empfindlichkeitsbereich wurde, bei einer im Elastomer absorbierten Lichtleistung von etwa 20 mW, aufgrund thermischer Instabilität innerhalb einer Meßdauer von vier Stunden mehrmals durchlaufen.

Die Rechteckimpulsantwort (Bild 1 rechts) zeigt Tiefpasseigenschaften und gibt die Auslenkung lichtreflektierender Partikel vor der schallhart begrenzenden Faser wieder.

Elastomer	C <sub>0</sub> [⊯∕s]	ρ <sub>0</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Ro	ΔR/(R <sub>0</sub> ·p) [1/bar]	p <sub>min</sub> [bar]	
Polyurethan schwarz	1551	1180	8.28.10-4	+6.6.10-4	1.5	
Silikon schwarz	997	1050	$2.91 \cdot 10^{-3}$	-6.4.10-4	1.6	
transparent	1013	1010	8.35.10-4	-1.3.10-3	0.77	
weiß	997	1060	7.60.10 <sup>-3</sup>	$\pm 3.6 \cdot 10^{-3}$	0.28	
"silber"	1000	1030	1.66.10 <sup>-3</sup>	$\pm 6.6 \cdot 10^{-3}$	0.15	
Wasser, 25°C	1497	997	$3.00 \cdot 10^{-3}$	-2.0.10-4	5.0	

<u>Tabelle 1</u>: Akustische und optische Daten der elastomerbeschichteten Glasfaser. Der Brechungsindex des Elastomers folgt aus R<sub>0</sub> bei bekanntem n<sub>K</sub>=1.483 nach Gl. (1). Der minimal detektierbare Druck p<sub>min</sub> ist als Quotient des Rauschpegels (1·10<sup>-3</sup>) und der Hydrophonempfindlichkeit  $\Delta R/(R_0 \cdot p)$  gegeben /2/.

5. Schrifttum

/1/ Staudenraus, J., Eisenmenger, W., Fortschritte der Akustik-DAGA'88, 467

/2/ Staudenraus, J., Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 21, Nr. 89 (1991)

/3/ Eisenmenger, W., Acustica 12, 165 (1962)

- /4/ Staudenraus, J. et al., Fortschritte der Akustik-DAGA'91, 221
- /5/ Staudenraus, J., Eisenmenger, W., Fortschritte der Akustik-DAGA'91, 217