

Ein faseroptischer Verschiebungssensor zur Charakterisierung und Quantifizierung von hochintensiven Ultraschallfeldern

Julian Haller, Klaus-Vitold Jenderka, Christian Koch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, 38116 Braunschweig, E-Mail: julian.haller@ptb.de

Einleitung

In den letzten Jahren ist in der Tumor-Therapie ein stetiger Anstieg der Anzahl an HITU-Behandlungen (HITU- High Intensity Therapeutic Ultrasound) zu beobachten, bei denen ein stark fokussierter Ultraschallstrahl malignes Gewebe erwärmt und dadurch nekrotisiert [1]. Für die Therapieplanung einer möglichst wirkungsvollen und zugleich für gesundes Gewebe ungefährlichen Behandlung ist eine genaue Kenntnis der angewandten HITU-Felder unerlässlich. Dabei erfordern die in einem stark fokussierten Bereich auftretenden hohen Drücke und Temperaturen (siehe Tabelle 1) Sensoren, die sowohl möglichst klein als auch extrem widerstandsfähig sind.

Tabelle 1: Typische Parameter von HITU-Feldern

Frequenz f	0.8 MHz – 4 MHz
Schallleistung P_{ak}	50 W – 250 W
Größe des Fokus	$\varnothing=1$ mm – 3 mm
	$l=10$ mm – 30 mm
Spitzendruck p	bis zu 50 MPa
Heizrate dT/dt	10 K/s und mehr

Lichtwellenleiter haben sich bereits mehrfach als robuste und kleine Ultraschallsensoren bewährt [2], so dass sie auch als eine potentielle Möglichkeit zur Charakterisierung und Quantifizierung von HITU-Feldern erscheinen.

In diesem Beitrag wird daher ein auf heterodyner Interferometrie basierender faseroptischer Verschiebungssensor vorgestellt und seine relevanten Messparameter wie der Frequenzgang, die Empfindlichkeit, die Widerstandsfähigkeit und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis werden diskutiert. Weiterhin werden erste Resultate von Messungen in HITU-Feldern präsentiert.

Experimenteller Aufbau

Der faseroptische Verschiebungssensor selber besteht aus einem senkrecht gebrochenen Monomode-Faserende (Manteldurchmesser 125 μm), auf dessen Stirnfläche 200 nm Titan aufgesputtert wurden. Eine auf den Sensor treffende Ultraschallwelle bewirkt eine Längenänderung δl des Sensors, die über einen frequenzabhängigen Transferfaktor $T(f)$ mit der durch die Schallwelle verursachten Partikelauslenkung ξ des umgebenden Wassers verknüpft ist:

$$\delta l = T(f) \cdot \xi \quad [\text{m}] \quad (1)$$

Im vorliegenden Messaufbau wird ein Laserstrahl durch einen akusto-optischen Modulator in einen Messstrahl und einen um 80 MHz frequenzverschobenen Referenzstrahl aufgeteilt. Die durch das Titan verspiegelte Faserendfläche

des Sensors stellt das Ende des Messarms eines Interferometers dar, so dass die Längenänderung des Sensors eine Phasenmodulation des reflektierten Strahls bewirkt. Durch Überlagerung dieses phasenmodulierten Strahls mit dem Referenzstrahl auf einer Photodiode erhält man ein entsprechend phasenmoduliertes Spannungssignal mit einer Trägerfrequenz von 80 MHz.

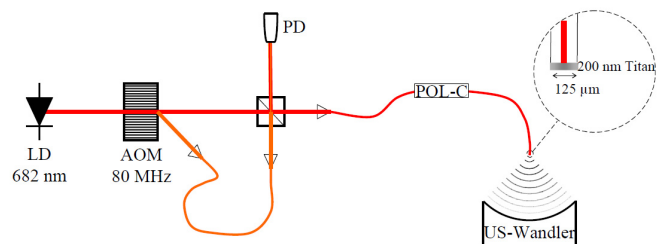


Abbildung 1: Interferometer-Aufbau. LD – Laserdiode; AOM – akusto-optischer Modulator; PD – Photodiode; POL-C – Polarisationssteller.

In einem Diskriminator (Abbildung 2) wird dieses phasenmodulierte Signal mit dem um die Diskriminatorverzögerungszeit τ verzögerten Signal überlagert, so dass am Diskriminatorausgang eine zur Momentanfrequenz proportionale Spannung vorliegt.

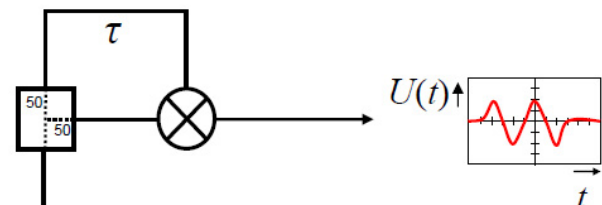


Abbildung 2: Diskriminator zur Umwandlung einer Frequenz- in eine Amplitudenmodulation.

Da die Momentanfrequenz der zeitlichen Ableitung der Momentanphase entspricht, ist also die am Diskriminatorausgang vorliegende Spannung, die auf einem Oszilloskop ausgegeben wird, proportional zur Schallschnelle $\partial\xi/\partial t$ statt zur eigentlichen Messgröße der Partikelauslenkung ξ . Mit dem bekannten Zusammenhang zwischen Schallschnelle und -druck p kann die gemessene Spannung als proportional zum am Sensor vorliegenden Schalldruck angesehen werden (ρ : Dichte und c_S : Schallgeschwindigkeit des Wassers):

$$p = \rho \cdot c_S \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Kalibrierung

Da insbesondere der Transferfaktor $T(f)$ kaum analytisch berechenbar ist, wurde die Empfindlichkeit $M=U/p$ des gesamten Messaufbaus über eine Vergleichsmessung mit einem Interferenzschichthydrophon [3] im Feld eines breitbandigen Ultraschallwandlers kalibriert (Abbildung 3). Mit der so bestimmten Empfindlichkeit kann aus jedem zeitlichen Spannungssignal durch Entfaltung im Frequenzraum der Druckverlauf gewonnen werden.

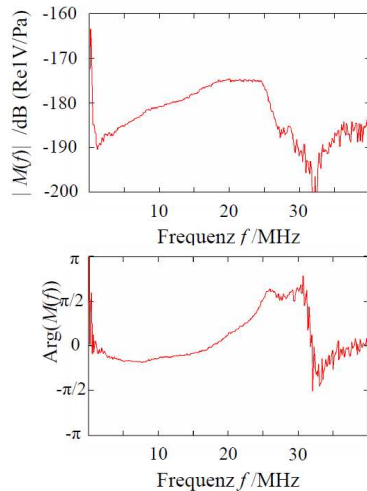


Abbildung 3: Betrag (oben) und Phasenlage (unten) der Empfindlichkeit $M(f)$ des faseroptischen Messsystems.

Empfindlichkeit, Widerstandsfähigkeit und Signal-zu-Rausch-Verhältnis

Die Empfindlichkeit des Messaufbaus und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis sind primär von der gewählten Diskriminatorlänge $l_\tau = \tau \cdot c/n$ ($c=3 \cdot 10^8$ m/s, $n=1.5$) abhängig: Bei Wahl einer größeren Diskriminatorlänge wird der Betrag der Empfindlichkeit M um einen in erster Näherung frequenzunabhängigen Faktor angehoben und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nimmt zu. Allerdings nimmt mit zunehmender Diskriminatorlänge der maximal demodulierbare Druck ab. Die vorliegenden Messungen wurden daher mit einer Diskriminatorlänge von $l_\tau=60$ cm ($\tau=3$ ns) durchgeführt, für die sich eine Empfindlichkeit von $|M(1 \text{ MHz})|=3 \cdot 10^{-10}$ V/Pa und ein Rausch-äquivalenter Druck von ca. 500 kPa bei einer Bandbreite von 20 MHz ergibt.

Die Widerstandsfähigkeit der Sensoren gegen Erwärmung, Druck und Kavitation kann wie folgt bewertet werden: Da alle Messungen in HITU-Feldern im Burst-Modus mit niedriger Wiederholrate durchgeführt wurden, ist nicht von einer nennenswerten Erwärmung der Sensoren auszugehen – bei gezielter Erwärmung im Wasserbad überstanden alle Sensoren allerdings Temperaturen bis zu 100 °C. Die Zerstörung der Sensoren ist daher vor allem übermäßiger mechanischer Belastung durch hohe Drücke und der Kavitationswirkung zuzuschreiben. Die konkrete maximale Belastung der Sensoren erweist sich dabei als stark abhängig von der Qualität der Beschichtung - von verschiedenen benutzten Sensoren widerstanden einzelne positiven Spitzendrücken von 40 MPa, andere brachen bereits bei geringeren Drücken ab (Druckwirkung) bzw. es löste sich die verspiegelnde Titanschicht von der Faser (möglicherweise durch Kavitationswirkung).

Resultate von Schallfeldmessungen

Für eine unabhängige Verifizierung wurden zunächst Messungen des faseroptischen Systems im Fokus eines HITU-Wandlers mit den Messungen eines Membranhydrophons an gleicher Stelle des Schallfeldes und bei gleicher akustischer Ausgangsleistung verglichen (Abbildung 4). Dabei wurden im betrachteten Leistungsbereich Abweichungen von maximal 15% bei den Spitzendruck-Werten gefunden.

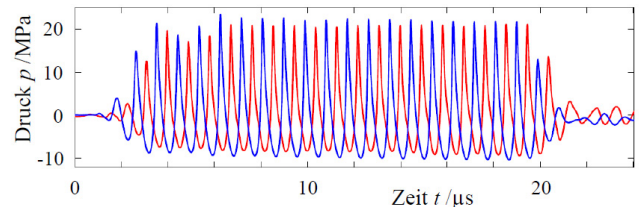


Abbildung 4: Vergleich der Messungen in einem HITU-Feld zwischen faseroptischem Hydrophon (rot) und Membranhydrophon (blau). Zur besseren Unterscheidbarkeit ist die faseroptische Messung um eine halbe Schwingungsdauer zeitlich verschoben.

In Abbildung 5 sind exemplarisch für die Quantifizierung des Schallfeldes eines HITU-Wandlers die relativen Spitzendrücke $p_{\max}(d)/p_{\max}(d=0)$ in Abhängigkeit vom Abstand d zum Fokus für zwei zueinander senkrechte Linienscans aufgetragen. Aus einer solchen Messung lassen sich zum einen Aussagen über die Symmetrie des Fokusbereichs treffen und zum anderen sein Radius bestimmen - z.B. als der Abstand, bei dem der Spitzendruck auf die Hälfte seines Maximalwertes abgenommen hat („-6dB-Radius“).

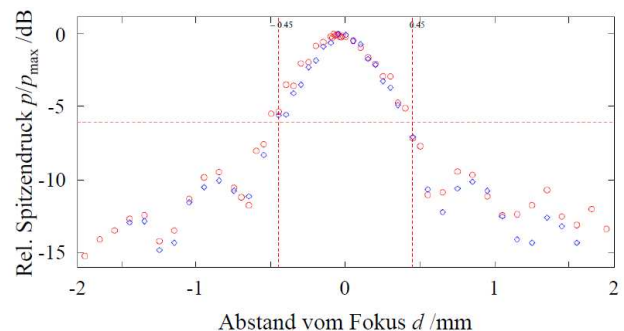


Abbildung 5: Linienscans durch den Fokus eines HITU-Wandlers für zwei zueinander senkrechte Linien (rot bzw. blau).

Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Europäischen Union im Rahmen des ERA-NET+-Projektes JRP7 finanziert.

Literatur

- [1] J. E. Kennedy, G. R. ter Haar, D. Cranston: High intensity focused ultrasound: surgery of the future?, Brit. J. of Rad. 76 (2003), 590-599.
- [2] G. Wild, S. Hinckley: Acousto-Ultrasonic Optical Fiber Sensors: Overview and State-of-the-Art, IEEE Sens. J. 8(80) (2008), 1184-1193.
- [3] V. Wilkens, C. Koch: Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone, J. Acoust. Soc. Am., 115 (6) (2004), 2892-2903.