

# Messung hochintensiver therapeutischer Ultraschallfelder (HITU) mit breitbandigen Membranhydrophonen

Volker Wilkens, Sven Sonntag, Olga Bessonova

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, E-Mail: volker.wilkens@ptb.de

## 1. Einleitung

Hochintensiver therapeutischer Ultraschall (HITU) wird in neuen Verfahren zum Beispiel zur Behandlung von Krebserkrankungen bereits klinisch eingesetzt. Damit eine effiziente und möglichst nebenwirkungs- und risikoarme Behandlung mit HITU möglich ist, müssen die eingesetzten Ultraschallfelder möglichst genau vorab gemessen werden. Diese Charakterisierung stellt eine besondere messtechnische Herausforderung dar, denn die extremen Schalldrücke und Intensitäten im Fokus der verwendeten Schallköpfe sind um einige Größenordnungen größer als beim diagnostischen Ultraschall oder der Physiotherapie, so dass die üblicherweise zur Feldmessung eingesetzten Sensoren leicht zerstört werden können. Weiterhin sind die Wellenformen aufgrund der nichtlinearen Schallausbreitung stark aufgesteilt und dadurch sehr breitbandig, woraus zusätzliche Anforderungen an das Messsystem resultieren. Eine aktuell in der IEC entstehende Vornorm [1] beschreibt daher zunächst eine behelfsmäßige Methode zur groben Charakterisierung der Felder. Dabei werden die Hydrophonmessungen bei geringer Amplitude durchgeführt und anschließend erfolgt eine lineare Extrapolation der Ergebnisse auf die klinischen Amplituden mittels Schallstrahlungskraft-Leistungsmessungen, die auch bei den hohen Ausgangsleistungen möglich sind [2]. Demgegenüber wird im vorliegenden Beitrag untersucht, inwieweit sich besonders breitbandige, ursprünglich für den diagnostischen Ultraschallbereich und als Referenzempfänger in der PTB entwickelte PVDF Membranhydrophone [3] für HITU Feldcharakterisierungen eignen.

## 2. Hydrophon und Messaufbau

Das verwendete Membranhydrophon (Abbildung 1, links) besitzt eine PVDF-Foliendicke von ca. 11  $\mu\text{m}$ , einen Elektrodendurchmesser von ca. 0,2 mm und einen integrierten Vorverstärker (Gain: 15,7). Der effektive, aus Richtcharakteristikmessungen abgeleitete Durchmesser beträgt ca. 260  $\mu\text{m}$  (Grenzwert bei großen Frequenzen). Ein grundsätzlicher Vorteil von Membranhydrophonen gegenüber Nadel- und Kapselhydrophonen ist im Fall von HITU-Feldmessungen, dass die Schallwelle nicht auf einen Absorptionskörper hinter dem empfindlichen Element trifft, so dass die sonst dadurch erfolgende starke Erhitzung entfällt. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist der extrem glatte Frequenzgang dieser Hydrophone, der nicht, wie es bei Nadelhydrophonen oder faseroptischen Sensoren i. A. der Fall ist, durch radiale Resonanzen gestört wird. Das verwendete Hydrophon besitzt eine Übertragungsfunktion mit Schwankungen kleiner  $\pm 3$  dB in einer Bandbreite von 1 MHz bis 102 MHz mit der Dickenschwingungsresonanz bei etwa 69 MHz. Dadurch können auch die stark nichtlinear

aufgesteilten breitbandigen HITU Wellenformen ohne Entfaltungszugang korrekt gemessen werden.

Bei den durchgeführten Feldmessungen wurde ein fokussierender HITU Schallkopf (Sonic Concepts 101F101) mit einem Durchmesser von 64 mm und einer nominellen Brennweite von 63,2 mm verwendet. Dieser kann bei der Grundfrequenz, 1,06 MHz, und der dritten Harmonischen, 3,32 MHz, betrieben werden. Die Anregung erfolgte durch einen Signalgenerator (Tektronix AFG 3251) und einen Verstärker (Amplifier Research 500A 250), sowie einem elektronischen Impedanzanpassnetzwerk. Es wurden Tonbursts mit 20 Perioden und einer Wiederholfrequenz von 1 kHz verwendet. Der Schallkopf ist an einer Seitenwand eines Wasserbeckens montiert und emittiert in waagerechter Richtung (Abbildung 1, rechts). Das Hydrophon ist an einer xyz-Positioniereinrichtung befestigt und kann rechnergesteuert verfahren werden. Die Signalaufnahme erfolgte über ein Digitaloszilloskop (Tektronix DPO 7104) und die gemessenen Spannungs-Zeitverläufe wurden im Rechner gespeichert. Die weitere Auswertung erfolgte offline, wobei jeweils die mittleren Signalbereiche im eingeschwungenen Zustand ausgewertet wurden. Im Bereich hinter dem Hydrophon befindet sich eine Absorbermatte zur Verhinderung von störenden Reflexionen. Die Messungen fanden in deionisiertem und entgastem Wasser statt.

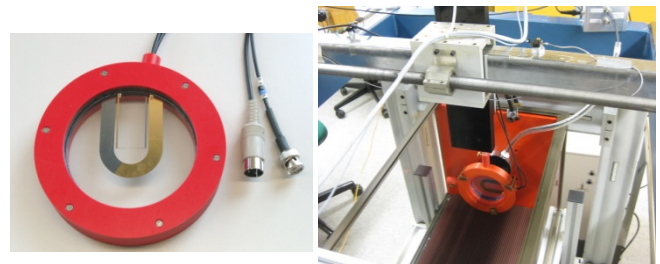


Abbildung 1: Links: Verwendetes Membranhydrophon; Rechts: Aufbau zur HITU Feldmessung im Wasserbecken.

## 3. Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die im Fokus gemessenen Schalldruckverläufe bei verschiedenen Anregungsamplituden für die Grundfrequenz von 1,06 MHz. Bei kleiner Amplitude und quasilinear Ausbreitung ergibt sich ein nahezu sinusoidaler Verlauf. Bei Erhöhung der Anregungsspannung lässt sich die nichtlineare Schallausbreitung an der zunehmenden Aufsteilung der Wellenformen deutlich erkennen. Die maximal gemessenen negativen und positiven Spitzenschalldrücke betragen  $p_r = 10$  MPa bzw.  $p_c = 27$  MPa. Bei dieser maximalen Messung trat Kavitation auf – es entstand ein hörbarer Ton mit der Burst-Wiederholfrequenz – so dass keine weitere Erhöhung vorgenommen wurde.

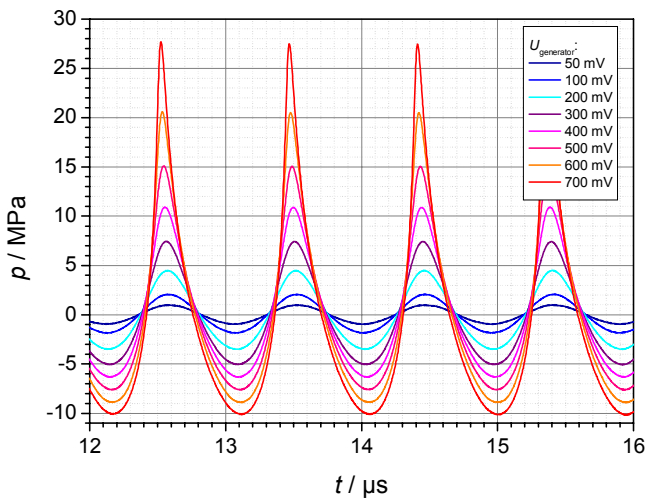


Abbildung 2: Schallwechseldruck bei verschiedenen Einstellungen der Generatorspannung; nichtlineare Aufsteilung der Wellenform.

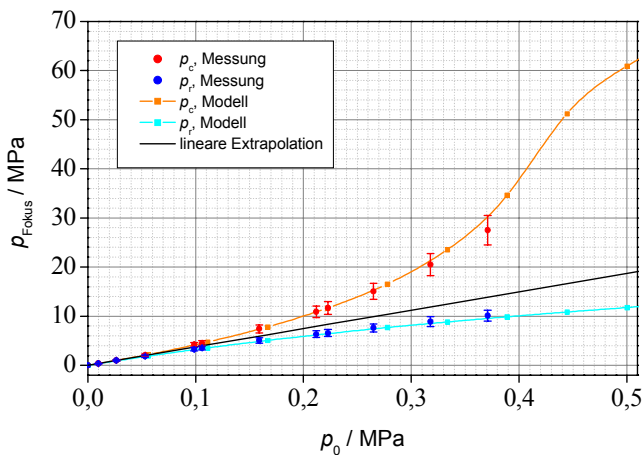


Abbildung 3: Vergleich der im Fokus gemessenen Spitzenschalldrücke  $p_{\text{Fokus}}$  in Abhängigkeit vom Ausgangswert am Wandler  $p_0$  mit Simulationsergebnissen.

In Abbildung 3 werden die im Fokus gemessenen Spitzenschalldrücke  $p_{\text{Fokus}}$  in Abhängigkeit vom Ausgangswert am Wandler  $p_0$  mit Simulationsergebnissen verglichen. Die Schallfeldsimulationen erfolgten für den vorliegenden Schallkopf wie in [4] beschrieben durch Verwendung der nichtlinearen parabolischen KZK-Gleichung für anfänglich harmonische Wellen mit uniformer Amplitudenverteilung an der Quelle. Es ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Mit zunehmender Amplitude an der Quelle resultiert aus dem kombinierten Effekt der nichtlinearen Ausbreitung und Beugung für die positiven Spitzendrücke eine asymmetrisch stärkere Zunahme als für die negativen. Ferner zeigt die Simulation für sehr große Amplituden ( $p_0 > 0,4$  MPa) den Sättigungseffekt durch die stärkere Schallschwächung der zunehmenden Anteile bei höheren Frequenzen.

Für eine mittlere Anregungsspannung schon deutlich im nichtlinearen Bereich zeigt Abbildung 4 ein laterales Schallbündelprofil im Fokus. Auch hier ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Hydrophonmessergebnisse mit der Schallfeldsimulation. Die volle  $-6$  dB-Bündelbreite des abgeleiteten Intensitätsprofils beträgt hier  $w_6 = 1,88$  mm und im Falle des Schallfeldes für  $f = 3,32$  MHz  $w_6 = 0,64$  mm.

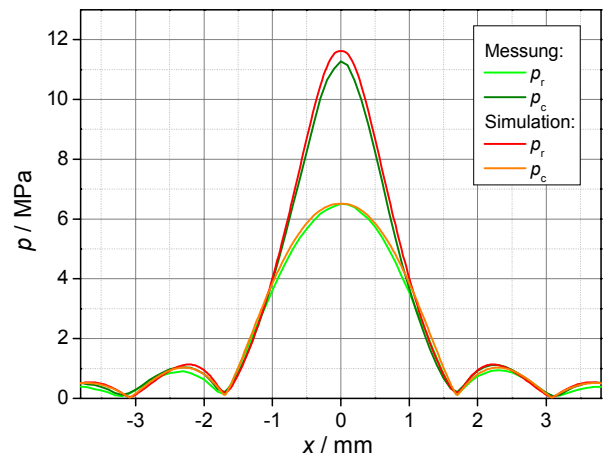


Abbildung 4: Laterales Schallbündelprofil im Fokus ( $p_0 = 222$  kPa); gute Übereinstimmung von Hydrophonmessung und Schallfeldsimulation.

#### 4. Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen insgesamt sowohl die prinzipiell vorteilhafte Einsetzbarkeit der Hydrophone als auch die bisherige technischen Grenzen. Die glatte Übertragungsfunktion ermöglicht eine unverfälschte Messung der Wellenformen ohne Entfaltungsrechnungen. Da die Hydrophone keinen Absorptionskörper besitzen, ist die potentielle Erhitzung des Sensors unkritisch. Die Messmöglichkeiten sind bezüglich der Amplitude bislang limitiert durch die einsetzende Kavitation im Wasser, da in diesem Fall zum einen die Schallbündelprofile zeitlich instabil werden und zum anderen die Elektroden erodiert werden. Kurzzeitig auftretende Kavitation vermindert die Funktionsfähigkeit noch nicht, aber nach wiederholter und länger anhaltender Kavitation kommt es zur deutlichen Schädigung und Zerstörung. Eine zusätzliche Schutzbeschichtung könnte hier zu Verbesserungen führen. Die Tonburstlänge kann und muss bei der Schallfeldcharakterisierung im Vergleich zur klinischen Anwendung reduziert werden, um Störungen durch Reflexionen und elektrische Einstreuung zu vermeiden.

#### Literatur

- [1] IEC: Ultrasonics – Surgical systems – Specification and measurement of field parameters for High Intensity Therapeutic Ultrasound (HITU) transducers and systems. International Electrotechnical Commission, Committee Draft for Technical Specification, IEC 62556 TS (2011).
- [2] Jenderka, K.-V., Beissner, K., Haller, J.: Metrology of HITU fields. Proc. NAG/DAGA 2009 Rotterdam, 325-327.
- [3] Wilkens, V., Molkenstruck, W.: Broadband PVDF membrane hydrophone for comparisons of calibration methods up to 140 MHz. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. 54 (2007), 1784-1791.
- [4] Bessonova O. V., Khokhlova V. A., Bailey M. R., Canney M. S., and Crum L. A.: Focusing of high power ultrasound beams and limiting values of shock wave parameters, Acoust. Phys. 55 (2009), 463-473.