

## Untersuchung von Kavitation an sehr kleinen Ultraschallwandlern

Till Nowak, Robert Mettin<sup>1</sup>, Werner Lauterborn

*Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen,  
Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Deutschland,*

<sup>1</sup>*Email: R.Mettin@physik3.gwdg.de*

### Einleitung

Ein fundamentales Problem in der Beschreibung sowie der Anwendung von Kavitation ist ihre Skalierung bzw. in vielen Fällen auch ihre Nicht-Skalierbarkeit. Im Falle akustischer Kavitation bezieht sich das insbesondere auf die Schallfrequenz, deren Variation oft zu sogenannten "Frequenzeffekten", also qualitativen Übergängen der sich einstellenden Phänomene führen kann. Beispiele bilden z.B. bestimmte chemische Reaktionen oder Emulsifikationen, die im unteren kHz-Bereich völlig anders ablaufen als im unteren MHz-Bereich. Grundlage hierfür können nicht nur die bekannten Unterschiede in Bezug auf Kavitationskeimgrößen, Viskositätseffekte oder Volumeneindringtiefen des Ultraschalls bilden, sondern auch die konkrete Auslegung des Schallwandlers. Um diesen Einfluss besser zu verstehen, wird hier das Kavitationsverhalten an Ultraschallhörnern untersucht [1, 2]. Typischerweise werden derartige Wandler in Anwendungen um 20 kHz betrieben und auch als Mason-Hörner, Sonotroden oder Disintegratoren bezeichnet. Im Folgenden sind nun insbesondere höhere Frequenzen und die dabei auftretenden Phänomene im Vergleich zu denen bei 20 kHz von Interesse. Sie werden hier mit vergrößernden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen untersucht.

### Schallwandler und Aufbau

Die Charakteristik eines Schallwandlers wird unter anderem von seiner typischen Abmessung  $D$  im Verhältnis zur abgestrahlten Wellenlänge  $\lambda$  bestimmt. Bei kommerziellen Schallhörnern um 20 kHz ( $\lambda = 7.5$  cm) gilt meist  $D < \lambda$ , da die Durchmesser der Spitzen selten größer als 1 cm sind. Dadurch wirkt die Spitze annähernd als (Halb-)Kugelstrahler. Wandler im Bereich von MHz ( $\lambda = 0.15$  cm) bilden derzeit dagegen fast immer Flächenstrahler mit entsprechend kompliziertem Nahfeld, da ihre Abmessungen ebenfalls um einige cm liegen und  $D > \lambda$  wird. Vergleicht man daher Kavitation bei 20 kHz an einer Schallhornspitze mit Kavitation bei 1 MHz an einem Flächenwandler, so hat man es zunächst mit sehr unterschiedlichen Feldcharakteristiken zu tun, was sich durchaus in Eigenschaften der Kavitationsblasen und Blasenstrukturen äußern kann. Dies liefert die Motivation, beim Anheben der Schallfrequenz ebenfalls die Emitterfläche zu verkleinern und zu untersuchen, wie sich Kavitation an sehr kleinen Schallhörnern abspielt. Für diese Untersuchungen wurden mehrere Sonotroden als Verbundschwinger mit Exponentialhornspitze konstruiert, die eine Resonanz bei der gewünschten Frequenz aufweisen. Berechnet wurde die rückwärtige Masse

nach Sindyihubura [3] und die Exponentialspitze nach Kuttruff [2], wobei diese so angepasst wurde, dass der Schwingungsknoten zwischen den beiden Piezoelementen lag, um eine einfache Halterung der Sonotrode zu ermöglichen.

Es zeigte sich allerdings, dass es technisch mit den vorhandenen Mitteln nur schwer möglich war, Spitzen unter 1 mm Durchmesser präzise anzufertigen, so dass die gezeigten Untersuchungen zunächst auf diese Größe beschränkt sind. Im Folgenden verwendet wurden daher ein Exponentialhorn mit Spitzendurchmesser  $D = 2a = 10$  mm für 20 kHz sowie drei mit  $D = 1$  mm, die für 60 kHz, 100 kHz und 200 kHz ausgelegt waren.

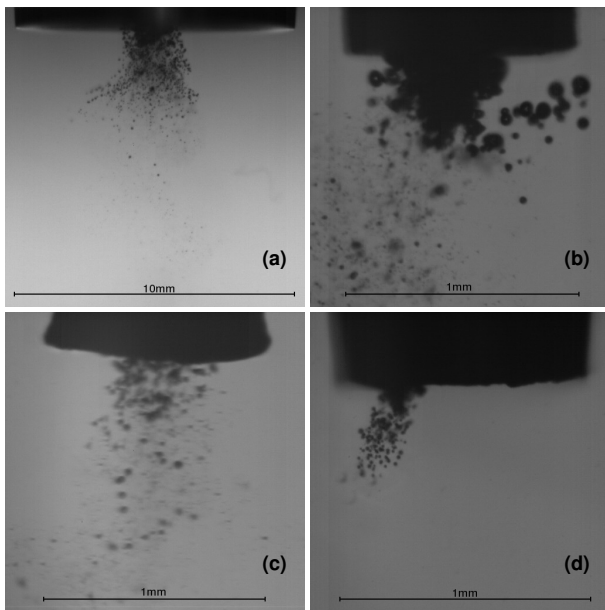
Die Ultraschallhörner wurden von einem Frequenzgenerator über einen Verstärker gespeist; teilweise wurde die Impedanz mit Spulen angepasst. Mit einer Photron Fastcam APX RS Hochgeschwindigkeitskamera wurden mit verschiedenen Objektiven Filme im Durchlicht aufgenommen, wobei sich Vergrößerung, Auflösung, Bildrate und Belichtungszeit in gewissem Rahmen variieren ließen. Es wurde ausschließlich destilliertes, nicht entgast Wasser verwendet.

### Ergebnisse

In Abb. 1 sind typische Blasenstrukturen an den vier untersuchten Sonotroden zu sehen. Hierbei ist zu beachten, dass die Teilbilder (b) bis (d) etwa zehnfach höher vergrößert sind als (a) und dass die Blasen jeweils etwa zu einer Schwingungsphase ihres maximalen Volumens abgebildet sind. Es lassen sich neben Ausdehnung des kavitierenden Gebietes und Blasendichten auch ungefähre Maximalradien ablesen.

Zunächst fällt auf, dass nicht die gesamte Sonotroden- spitze von Kavitationsblasen abgedeckt wird, wie z.B. in [4, 5] gezeigt, sondern dass es jeweils "aktive" Teilzonen gibt, vor denen ein seitlich und nach unten begrenztes Volumen sichtbar kavitiert. Dies konnte teilweise durch Variieren der Betriebsspannung geändert werden (bei 20 kHz), teilweise ergab sich aber auch immer ein derartiges Bild (200 kHz), evtl. weil die Leistung begrenzt war. Schließlich wurden visuell ähnliche Regime bei den verschiedenen Frequenzen zur Untersuchung ausgewählt.

In Tabelle 1 sind einige Daten der Sonotroden und Aufnahmen zum Vergleich zusammengefasst. Der Wert  $ka$  liegt für alle deutlich unter 1 und ist für (a) und (d) fast gleich. Die Auslenkungen der Spitzen wurden ebenfalls Hochgeschwindigkeitsaufnahmen entnommen, sind aber vermutlich sehr fehlerbehaftet. Aus ihnen berechnet sich die idealerweise von einem Kolbenstrahler abgestrahlte



**Abbildung 1:** Blasenstrukturen an den vier untersuchten Sonotroden, Maßstab jeweils angegeben. Belichtungszeit jeweils  $2 \mu\text{s}$ . Ultraschallfrequenzen: (a) 20.61 kHz; (b) 58.5 kHz; (c) 101.4 kHz; (d) 204.4 kHz.

Gesamtleistung und daraus die Intensität  $I_K$  an der Spitze. Diese steigt stark mit der Frequenz an und scheint daher kein guter Parameter für die Strukturgestalt der Blasen zu sein.

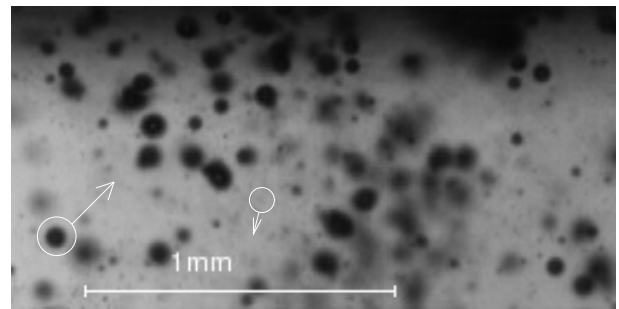
Die Blasenmaximalradien wurden bezüglich der größten nicht direkt an der Sonotroden Spitze beobachteten Blasen ( $\hat{R}_{max}$ ) und der "typischen" größten Blasen ( $\hat{R}_{avg}$ ) ausgewertet. Sie fallen jeweils stark mit der Frequenz ab. Als theoretischer Vergleichswert ist der Blasenmaximalradius  $R_{SI,1.5}$  angegeben, der sich ergibt, wenn man parametrische sphärische Oberflächeninstabilität bei 1.5 bar Anregungsdruck als größenbegrenzenden Mechanismus annimmt (Rechnung mit dem Modell aus [6]). Der Druckwert von 1.5 bar ist allerdings etwas willkürlich gewählt und nicht direkt gemessen oder abgeleitet worden. Die theoretischen Werte zeigen jedoch, dass diese Instabilität zumindest ähnlich skaliert wie die Beobachtungen. In der Tat sind auch weitere größenbestimmende Faktoren denkbar, insbesondere Wechselwirkungen mit Nachbarblasen oder dem Strömungsfeld, die in der Rechnung nicht berücksichtigt wurden.

Eine nähere Analyse der Blasenbewegungen vor der Sonotroden Spitze bei 20 kHz zeigte eine gewisse Dreiteilung der Blasenstruktur: 1. die "aktive" Zone direkt an der Emitterfläche, die oft auch als große deformierte Blase oder dichtes zusammenhängendes Blasenkonglomerat erscheint; 2. große Blasen, die starke Volumenoszillationen ausführen und sich oft auf die aktive Zone zu bewegen; 3. sehr kleine Blasen, die nicht stark oszillieren und die anscheinend in der Flüssigkeitsströmung von der Hornspitze weggetragen werden. In Abb. 2 sind eine große und eine kleine Blase mit ihren Bewegungsrichtungen markiert. Gemessen wurden Geschwindigkeiten von etwa 1.5 m/s bzw. 0.2 m/s für große bzw. kleine Blasen. Eine ähnliche Aufteilung der Blasenpopulationen lassen

**Tabelle 1:** Daten zu den Sonotroden in Abb. 1: Ultraschallfrequenz  $f$ , Spitzenradius  $a$ ,  $ka = 2\pi fa/c$  ( $c = 1486 \text{ m/s}$ ), Auslenkung (peak-peak)  $d_{pp}$ , Intensität  $I_K$  entsprechend idealem Kolbenstrahler [2], größte beobachtete maximale Blasenradien  $\hat{R}_{max}$ , durchschnittlich große Maximalradien  $\hat{R}_{avg}$ , und theoretischer größter Maximalradius bei 1.5 bar Wechseldruck  $R_{SI,1.5}$ .

$f$ [kHz]	20.6	58.5	101.4	204.4
$a$ [mm]	5	0.5	0.5	0.5
$ka$	0.44	0.12	0.21	0.43
$d_{pp}$ [ $\mu\text{m}$ ]	11	38	13	4.6
$I_K$ [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]	3.5	28	29	59
$\hat{R}_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	50-73	35-37.5	19.5-23.5	9-10.5
$\hat{R}_{avg}$ [ $\mu\text{m}$ ]	42-52	25-31.5	13-19.5	5.5-7
$R_{SI,1.5}$ [ $\mu\text{m}$ ]	80	32	22	12

auch die Aufnahmen bei höheren Frequenzen erkennen, auch wenn bisher keine Geschwindigkeiten ausgewertet werden konnten.



**Abbildung 2:** Detailaufnahme der Blasen bei 20 kHz.

## Zusammenfassung

Es wurde Kavitation an Schallhörnern verschiedener Abmessungen bei verschiedenen Frequenzen untersucht. Bei der Skalierung der Wandler zeigt sich eine große Ähnlichkeit der beobachteten Blasenstrukturen bei ähnlichen  $ka$ . Blasenmaximalradien folgen grob etwa dem Kehrwert der Frequenz, was durch Oberflächeninstabilitäten bei konstanter Anregungsamplitude nachgezeichnet werden kann. Die Bewegungen der Blasen sind uneinheitlich; die Population teilt sich, zumindest bei 20 kHz, in "große" stark schwingende und "kleine" passive Blasen, neben dem direkt auf dem Wandler sitzenden Blasenagglomerat, auf. Ihre Bewegungen können vermutlich durch akustische (große Blasen) und viskose Kräfte in der Flüssigkeitsströmung (kleine Blasen) erklärt werden.

## Literatur

- [1] W. P. Mason & R. F. Wick, *J. Acoust. Soc. Am.* **23**, 209 (1951).
- [2] H. Kuttruff, *Physik und Technik des Ultraschalls*, S. Hirzel Verlag Stuttgart 1988.
- [3] D. Sindayihebura *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 1442 (1998).
- [4] R. Mettin, in: A. A. Doinikov (ed.): *Bubble and Particle Dynamics in Acoustic Fields: Modern Trends and Applications*, Research Signpost, Kerala (India) 2005, 1.
- [5] A. Moussatov *et al.*, in: *Proceedings of the World Congress on Ultrasonics 2003*, Paris (France), 955 (2003).
- [6] D. Krefting *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.* **112**, 1918 (2002).