

## Auflösung der Blasengrößenverteilung nach Phasenlage in akustischer Kavitation

Khadija Ayaz-Bustami<sup>1</sup>, Julian Eisener<sup>1</sup>, Robert Mettin<sup>1</sup>, Sergey Lesnik<sup>2</sup> und Gunther Brenner<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Drittes Physikalisches Institut, Georg-August-Universität Göttingen  
Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Germany

Email: Khadija.Ayaz-Bustami@phys.uni-goettingen.de, Robert.Mettin@phys.uni-goettingen.de

<sup>2</sup>Institut für Technische Mechanik, TU Clausthal

Adolph-Römer Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany

Email: Sergey.Lesnik@tu-clausthal.de, Gunther.Brenner@tu-clausthal.de

### Einleitung

Die akustische Kavitation [1,2] findet in verschiedenen Bereichen der Technik Anwendung, so in der Ultraschallreinigung [3,4] und der Sonochemie [5]. Die modellhafte Beschreibung und die Vorhersage der Kavitationsphänomene gelingen allerdings nicht immer mit hinreichender Genauigkeit, obwohl derartige Anwendungen seit Jahrzehnten bekannt sind und eingesetzt werden. Mit ein Grund hierfür ist die unzureichende Kenntnis der Blasenverteilungen in realistischen Kavitationsfeldern. Mit den hier vorgestellten Arbeiten sollen zusätzliche Daten für die statistische Beschreibung von Blasenfeldern gewonnen werden. Dabei werden Beobachtungen von akustischen Kavitationsblasen in wässrigem Medium nach Phasenlage der Anregung ausgewertet.

Typische Reinigungsbäder oder sonochemische Reaktoren verwenden zum Teil größere Volumina und sind mit Boden- oder Wandschwingern bestückt, so dass sich stehende Wellenfelder ausbilden. Bei hinreichender Entgasung des Mediums treten dann oft Doppelschicht-Strukturen von Blasen auf („Jellyfish“-Strukturen), die sich beidseitig von Anregungsdruck-Knotenflächen ausbilden [6,7,8]. Diese häufige Blasenstruktur wird im Folgenden bei 25 kHz Anregung in einer wassergefüllten Küvette untersucht. Ziel ist dabei letztlich die Bestimmung der Verteilung der Ruheradien  $R_n$  der Blasen in der Blasenpopulation und die Bestimmung der Anzahldichte  $N(R_n)$  in der Struktur.

### Messung der Blasenverteilung

Das Testsystem ist in Abb. 1 gezeigt. Die Wandler am Küvettenboden werden von einem Funktionsgenerator (HP 33120A) über einen Verstärker (E&I 1040L) und eine Impedanzanpassung bei ca. 25 kHz gleichphasig betrieben. Bei eingetragener elektrischer Gesamtleistung von 150 W und moderater Betriebsdauer ist das verwendete Leitungswasser (ca. 25°C) teilentgast, und es treten Doppelschichtstrukturen etwa auf halber Höhe über den Wandlern auf. Um räumliche Fluktuationen zu verhindern und eine Struktur „einzufangen“, wird ein Draht über eine verstellbare Halterung senkrecht eingeführt. Die Blasen können dann eine Weile relativ stabil am Ort gehalten werden. Mit einer Hochgeschwindigkeits-Kamera (Photron

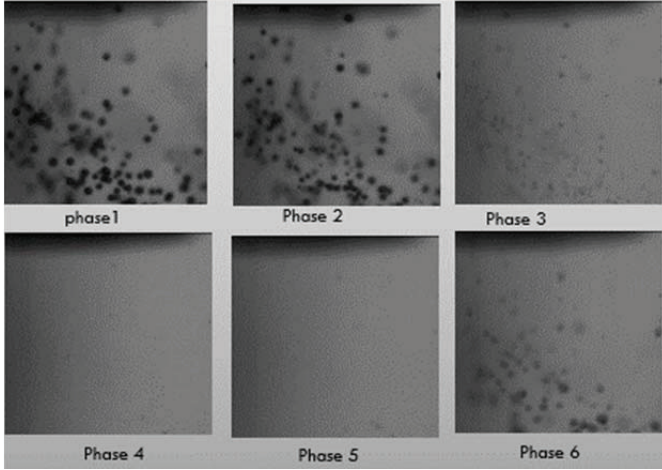
APX RS) werden von der Seite Aufnahmen im Durchlicht gemacht, die anschließend ausgewertet werden. Beleuchtungsquelle ist eine helle, weiße LED im Dauerbetrieb.



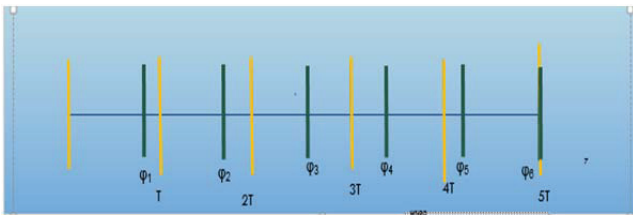
**Abbildung 1:** Bild der verwendeten Küvette: Länge 140 mm, Breite 70 mm und Höhe 130 mm, Wände aus PMMA und Boden aus Edelstahl. Resonanzfrequenzen der am Boden angebrachten Schallwandler liegen etwa bei 25 kHz und bei 45 kHz.

Durch die akustische Anregung führen die Blasen Volumenschwingungen und Translationsbewegungen aus [1,2]. Beides wird von der Videosequenz dargestellt, in der die Blasen dunkel vor hellem Hintergrund erscheinen, siehe Abb. 2. Durch eine möglichst kurze Belichtungszeit (hier 1  $\mu$ s) wird versucht, die momentanen Blasengrößen zum Beobachtungszeitpunkt „einzufrieren“. Die Auflösung der Aufnahme muss allerdings in einem Kompromiss mit der Größe des beobachteten Sichtfelds gewählt werden, da die Pixelanzahl bei gegebener Aufnahmerate beschränkt ist. Das führt im gezeigten Beispiel von Abb. 2 dazu, dass die kollabierten Blasen teilweise mangels Vergrößerung nicht mehr sichtbar sind. Umgekehrt verfügt man dann aber über eine größere Stichprobe und einen besseren räumlichen Eindruck der Blasenverteilung. Bei einer akustischen Anregungsfrequenz von  $f = 25$  kHz (Anregungsperiode  $T = 1/f = 40$   $\mu$ s) und einer Videoaufnahme mit 30000 Bildern/Sekunde (fps; Bildabstand  $\Delta = 33.33$   $\mu$ s) entstehen Aufnahmen bei den gezeigten sechs

unterschiedlichen Phasenlagen zur Anregung. Diese synchrone Überabtastung ist in Abb.3 noch einmal schematisch dargestellt. Zu beachten ist, dass die logische Abfolge (bei einer Rückprojektion auf eine einzige Anregungsperiode) in umgekehrter Richtung läuft, also die Phasen in der Reihenfolge 6-5-4-3-2-1 auftreten.



**Abbildung 2:** Aufeinanderfolgende Bilder einer Videosequenz bei 25 kHz Anregungsfrequenz und 30000 fps Aufnahmegeschwindigkeit ( $T = 40 \mu\text{s}$ ,  $\Delta = 33,33 \mu\text{s}$ ; Bildbreite:  $\sim 1,7 \text{ mm}$ ). Bei Phase 4 und 5 liegen die meisten Blasen (gerade kollabiert) unter der Auflösungsgrenze.



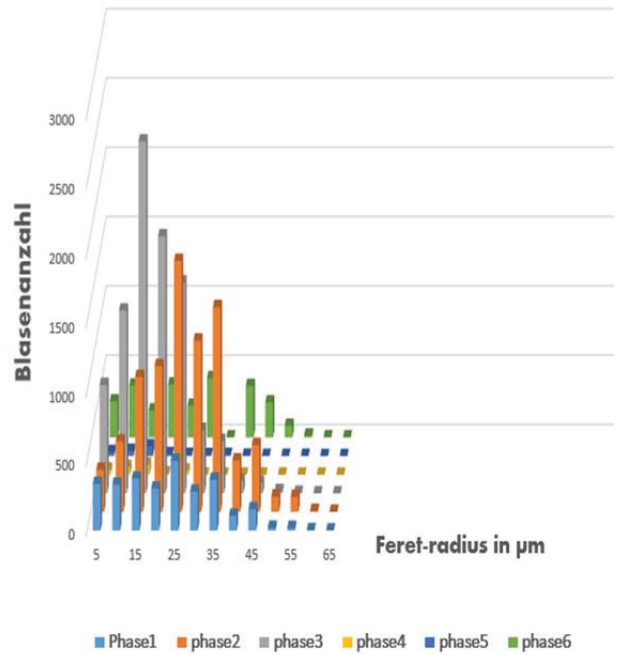
**Abbildung 3:** Anregungsperioden (gelb) und Aufnahmezeitpunkte (grün) mit den entstehenden fixen Phasenlagen  $\varphi_1$  bis  $\varphi_6$ . Jedes sechste Bild liegt auf der gleichen Anregungsphase und liefert ähnliche Blasengrößen, dazwischen liegen jeweils 5 volle Anregungsperioden.

Die Videodaten wurden mithilfe der Software ImageJ [9] ausgewertet, wobei über „Partikelanalyse“ Histogramme für die Häufigkeit der beobachteten Momentanradien erzeugt wurden. Eine Auswertung der Beispielsequenz ist in Abb. 4 gezeigt.

### Simulation der Blasenverteilung

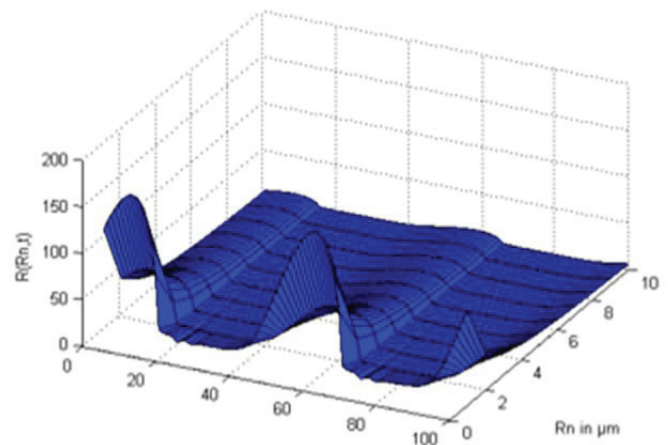
Um die gemessenen Histogramme mit einer theoretischen Verteilung zu vergleichen, werden mit dem Keller-Miksis-Modell [2] die Schwingungen einzelner sphärischer Blasen einer vorgegebenen Verteilung der Ruheradien berechnet. Als Anregung wird ein sinusförmiger Schalldruck der Amplitude  $p_a = 150 \text{ kPa}$  für alle Blasen verwendet. Dies ist sicher eine Idealisierung, aber zumindest die in Doppelschichtstrukturen gemessenen Druckamplituden

fallen in diesen Bereich [8]. Realistischere Anregungsformen würden nach diesen Messungen im negativen Druckbereich flachere Verläufe und eine gewisse räumliche Variation der Amplitude aufweisen [8].



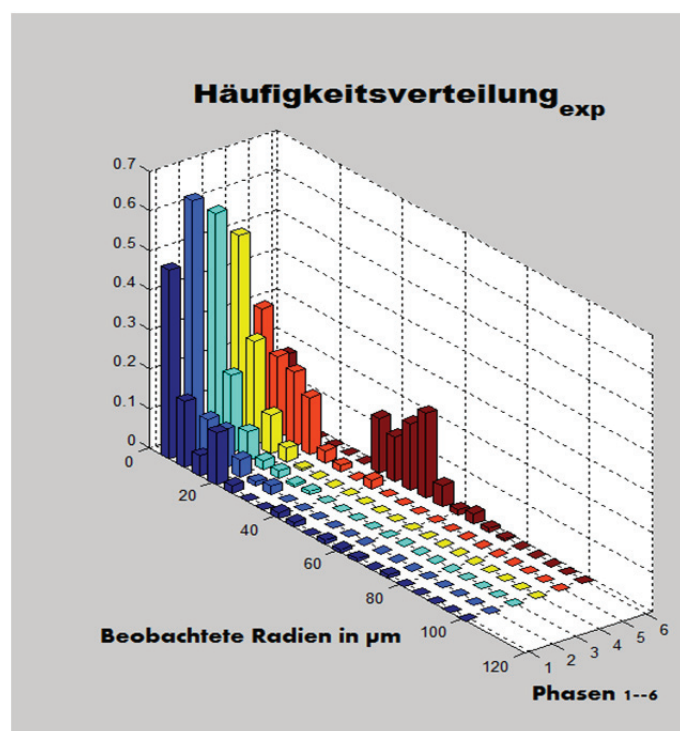
**Abbildung 4:** Blasengrößenverteilung nach Phasenlage. Logisch aufeinanderfolgende Blasenzustände laufen von hinten (Phase 6, Kollaps) über Phasen 5 und 4 (kollabierte Blasen) nach vorne (Phasen 3, 2 und 1; Wiederaufschwingen bis zu den jeweiligen Maximalradien).

Aus dem hier verwendeten einfacheren Ansatz ergeben sich für Ruheradien  $R_n$  von  $1 \mu\text{m}$  bis  $10 \mu\text{m}$  die in Abb. 5 gezeigten Oszillationen.



**Abbildung 5:** Blasenradiusschwingung  $R(R_n, t)$  nach dem Keller-Miksis Modell für die Parameter  $p_a = 150 \text{ kPa}$  und  $R_n = 1, \dots, 10 \mu\text{m}$  (isothermes Gasverhalten in Wasser unter Normalbedingungen). Gezeigt sind zwei Schwingungsperioden nach erfolgtem Einschwingprozess.

Die numerischen Radius-Zeit-Daten werden nun an 6 äquidistanten Messphasen mit einer vorgegebenen angenommenen Verteilungsfunktion der Ruheradien gewichtet und als erwartete Häufigkeitsverteilung der beobachteten Radien aufgetragen, siehe Abb. 5 (vergleiche auch [10]). Hierbei wurde eine exponentiell zu größeren Ruheradien hin abfallende Verteilung angenommen mit der Wahrscheinlichkeitsdichte  $f = A \exp(-R_n/\delta)$  in einem Ruheradiusintervall  $[0, R_{n,max}]$ . Der Normierungsfaktor ergibt sich dann zu  $A = \delta[1 - \exp(-R_{n,max}/\delta)]$ . Für  $R_{n,max} = 20 \mu\text{m}$  und  $\delta = 5 \mu\text{m}$  findet man eine Häufigkeitsverteilung wie in Abb. 6, hier mit der Bin-Breite von  $5 \mu\text{m}$ .



**Abbildung 6:** Berechnete Häufigkeitsverteilung der beobachteten Blasengrößen nach Phasenlage: aufgetragen ist die relative Häufigkeit über beobachtetem Radius (Intervalle von  $5 \mu\text{m}$ ) und Phasenlage.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, sinnvolle Häufigkeitsverteilungen der beobachteten Blasenradien aus experimentellen phasenstarrten Aufnahmen zu gewinnen. Eine Steigerung der Anzahl ausgewerteter Phasen erscheint in Zukunft sinnvoll und machbar. Der Vergleich mit theoretischen Modellen für eine Aussage über die Grundverteilung der Ruheradien in den Kavitationsstrukturen basiert bisher auf einigen vereinfachenden Annahmen, die eventuell modifiziert und realistischer gemacht werden können. Hierzu zählt u.a. die harmonische Anregung fester Amplitude. Im realen System variiert die Amplitude über die Ausdehnung der Blasenstruktur und besitzt anharmonische Anteile (z.B. ein

abgeflachtes Unterdruckmaximum, vgl. [8]). Zudem können bisherige ad-hoc Annahmen zur Verteilung der Ruheradien durch numerische Anpassungen noch verbessert werden. Auf dem jetzigen Stand legen die bisherigen Daten aber durchaus nahe, dass die Grundverteilung mit etwa exponentiellem Abfall zu großen Ruheradien dargestellt werden kann. Dies ist eine erste wichtige Aussage für die Modellierung von Schallfeldern in kavitierenden Medien unter Berücksichtigung der Blasenpopulationen, wie sie im Rahmen dieses Forschungsprojekts weiter vorangetrieben werden soll.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung im Rahmen des Kooperationsprojektes ME 1645/5-1 (Georg-August-Universität Göttingen) / BR 1864/12-1 (TU Clausthal). J. E. und R. M. danken ebenfalls dem österreichischen Ministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend und der österreichischen Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung für finanzielle Unterstützung.

## Literatur

- [1] T.G. Leighton, *The Acoustic Bubble* (Academic Press, London, 1994).
- [2] W. Lauterborn, T. Kurz, Physics of bubble oscillations, Rep. Prog. Phys. 73.10 (2010), 106501.
- [3] J. Olaf, Oberflächenreinigung mit Ultraschall, Acustica 7 (1957), 253-263.
- [4] D. Krefting, R. Mettin, W. Lauterborn, High-speed observation of acoustic cavitation erosion in multibubble systems, Ultrason. Sonochem. 11.3 (2004), 119-123.
- [5] J. T. Mason, *Sonochemistry* (Oxford University Press, 1999).
- [6] R. Mettin, P. Koch, D. Krefting, W. Lauterborn, Advanced observation and modeling of an acoustic cavitation structure, in: O.V. Rudenko and O.A. Sapozhnikov (eds.), *Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century* (Proceedings of the 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA-16), Faculty of Physics, MSU, Moscow, 2002, vol. 2, pp. 1003-1006.
- [7] R. Mettin, J. Appel, D. Krefting, R. Geisler, P. Koch, W. Lauterborn, Bubble structures in acoustic cavitation: observation and modelling of a 'jellyfish'-streamer, Forum Acusticum Sevilla, Spain, 16-20 Sept. 2002 Special Issue of the Revista de Acustica, Vol. XXXIII, 2002, ULT-02-004-IP.
- [8] C. Koch, Sound field measurement in a double layer cavitation cluster by rugged miniature needle hydrophones, Ultrason. Sonochem. 29 (2016), 439-446.
- [9] National Institutes of Health, USA, <http://imagej.nih.gov/ij>
- [10] D. F. Rivas, L. Stricker, A. G. Zijlstra, H. J. Gardeniers, D. Lohse, A. Prosperetti, Ultrasound artificially nucleated bubbles and their sonochemical radical production, Ultrason. Sonochem. 20(1) (2013), 510-524.