

Systematische Untersuchung der Einzelblasen-Sonolumineszenz mit Zwei-Frequenz-Anregung

ROBERT METTIN, DAGMAR KREFTING und WERNER LAUTERBORN
Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen
Bürgerstr. 42-44, 37073 Göttingen

Die Lichtemission von sonolumineszierenden Einzelblasen, getrieben durch eine Grundmode bei 25 kHz und der ersten Harmonischen bei 50 kHz, wurde systematisch in Abhängigkeit von Amplituden und relativer Phase der Anregung untersucht. Vergleichsrechnungen mit Berücksichtigung eines veränderlichen Diffusionsgleichgewichts der Blasengröße liefern eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messungen unter Annahme der "Argon-Hypothese" für Einzelblasen-Sonolumineszenz.

Sonolumineszenz, d.h. die Lichtemission von kollabierenden Gasblasen in Flüssigkeiten unter Schalleinwirkung, wird seit der experimentellen Realisation von Einzelblasensystemen in akustischen Blasenfallen [1] wieder umfassend in Bezug auf alle beteiligten Parameter untersucht. Unter anderem wurde die Variation des anregenden Schallfeldes (Mehrfrequenzanregung) zur gezielten Beeinflussung der Lumineszenz vorgeschlagen [2] und experimentell umgesetzt [3], wobei auch eine erhöhte Lichtausbeute erreicht werden konnte. Allerdings fehlt bisher eine systematische Studie des Effektes über einen größeren Parameterbereich. Dies wurde hier realisiert [4]. Für den Vergleich mit Simulationsrechnungen muss man beachten, dass experimentell eine Variation einzelner Einflussgrößen nur schwierig bzw. gar nicht zu realisieren ist. Berücksichtigt werden sollte daher zumindest das Diffusionsgleichgewicht und die Oberflächenstabilität der Blase, die beide den beobachtbaren Parameterraum beeinflussen.

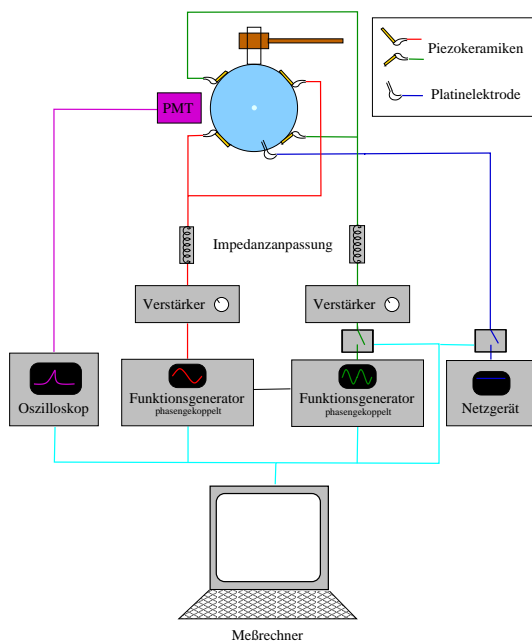


Abb.1: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Sonolumineszenz bei Zwei-Frequenz-Anregung.

Es wurde eine Zwei-Frequenz-Anregung durch zwei Piezokeramik-Paare an einer kugelförmigen Polystyrol-Küvette (Außendurchmesser 6 cm) verwirklicht. Mit den Frequenzen 25 kHz und

50 kHz wurden die sphärisch symmetrischen Bessel-Moden $j_{0,1}$ und $j_{0,2}$ angeregt, die beide im Zentrum ein Maximum besitzen. Die Modenamplituden P_1 und P_2 sowie die relative Phasenverschiebung φ (bzgl. Kosinus) zwischen den Moden konnten computergesteuert variiert werden. Ebenso wurden automatisch Blasen erzeugt und eingefangen sowie deren Lichtemission über einen Photomultiplier registriert, so dass sehr lange Messreihen vollautomatisch ablaufen konnten (Abb. 1). Es wurde mit demineralisiertem, entgastem und gefiltertem Wasser gearbeitet (Gasgehalt zwischen 10% und 40% des Sättigungsgehalts bei Luftdruck).

In einem Teil der Messungen wurde bei konstant gehaltener Amplitude P_2 und zunächst auch konstanter Phase φ die Größe P_1 schrittweise vergrößert, bis eine vorher eingefangene Blase leuchtete und schließlich bei noch höherer Amplitude zerstört wurde. Als Helligkeitswert ("Intensität") eines jeden Schrittes wurde der über mehrere Blitze gemittelte Maximalwert des Photomultipliersignals verwendet. Nach jeder P_1 -Schrittsequenz wurde bei um 18° erhöhter Phase und erniedrigtem P_1 eine neue Blase eingefangen, um anschließend erneut die Grundmodenamplitude zu erhöhen, usw.

Ein typisches Ergebnis einer solchen Messung sieht man in Abb. 2 oben links. Über P_1 und φ ist die Leuchtintensität helligkeitskodiert dargestellt, P_2 betrug ca. 20 kPa und der Gasgehalt des Wassers ca. 20% der Sättigung. Schwarze Bereiche unterhalb des V-förmigen Streifens entsprechen eingefangenen nichtleuchtenden Blasen, während in den schwarzen Bereichen darüber die Blasen zerstört sind. Man erkennt für aufsteigendes P_1 , dass zunächst schwaches Leuchten in stärkeres übergeht, worauf eine unregelmäßige Region schwacher Emission folgt. Hierbei handelt es sich um Bereiche instabiler Einzelblasen-sonolumineszenz, in denen die Blase wiederholt relativ langsam anwächst und plötzlich wieder in eine kleinere Blase zerfällt. Im Mittel führt das zu kleinen Helligkeitswerten, was aber darüber hinwegtäuscht, dass die maximale Helligkeit (kurz vor dem Zerfall) sehr groß sein kann.

In Bezug auf die Phasenvariation fällt die V-förmige Kurvenform des Emissionsgebietes auf:

Bei $\varphi \approx 200^\circ$ lässt sich mit relativ kleinster Amplitude P_1 die Lumineszenz anregen, bei $\varphi \approx 0^\circ$ liegt die relativ größte Schwelle. Die hellste Emission findet man in dem gezeigten Beispiel bei ca. 80° . Das gemessene Emissionsmuster konnte relativ gut durch numerische Simulation reproduziert werden. Hierbei wurde angenommen, dass bei beobachtbarem Leuchtprozess im wesentlichen nur die Argon-Konzentration in der Blase eine Rolle spielt und die anderen Gase (bzw. deren chemische Reaktionsprodukte) hindurchdiffundiert sind ("Argon-Hypothese" [5]). Für die dadurch effektiv auf 1/100 reduzierte Gas-(nämlich Argon-)Konzentration in der Flüssigkeit wurde über den Diffusionsansatz aus [6] für eine entsprechend mit zwei Frequenzen getriebene Blase der Gasdiffusions-Gleichgewichtsradius R_0 mit dem Keller-Miksis-Modell gesucht und – falls vorhanden – bestimmt. Anschließend wurde die Oberflächenstabilität einer solchen Blase ähnlich wie in [7] berechnet, wobei allerdings der Grenzwert des gerade noch stabilen Floquet-Multiplikators von 1 nach oben verschoben wurde, um die systematische Unterschätzung der Modendämpfung zu kompensieren. Jedem Parameterpaar (P_1, φ) , das bezüglich Diffusion und Oberflächenschwingungen eine rechnerisch stabile Blase zuließ, wurde eine Emissionsintensität proportional zu R_{max}^4/R_0 zugeordnet [8], wobei R_{max} den während der Schwingung auftretenden Maximalradius bezeichnet.

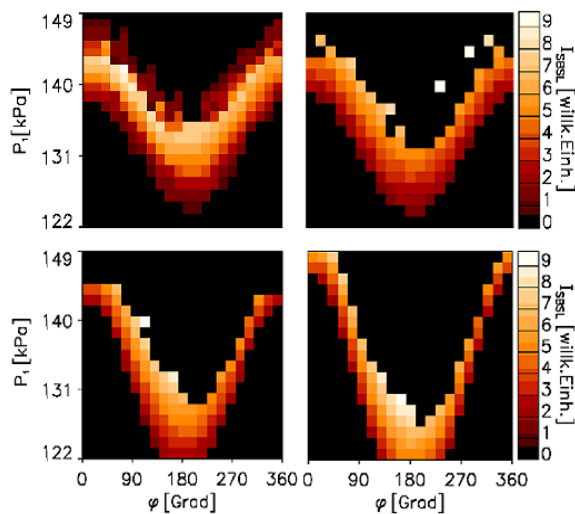


Abb.2: Gemessene Lichtemission bei $P_2 \approx 20$ kPa (o.li.) sowie Vergleichsrechnungen bei $P_2 = 10$ kPa (o.re.), 15 kPa (u.li.) und 20 kPa (u.re.).

In Abb. 2 sind drei Simulationsergebnisse zum Vergleich mit dem Experiment gezeigt, wobei die konstant gehaltene Amplitude der zweiten Harmonischen von Bild zu Bild variiert wurde. Die V-Form wird gut reproduziert, allerdings stimmt die genaue Lage bei einer etwas kleineren Amplitude P_2 am besten mit den Messungen überein. Dies kann an unerkannten systematischen Messfehlern liegen, oder aber auf Ungenauigkeiten des Modells beruhen.

Dass die Modellierung allerdings nicht nur stabile Parametergebiete und Leuchtverhalten, son-

dern auch die absoluten Blasengrößen relativ gut beschreiben kann, zeigt Abb. 3. Hier sind (über Hochgeschwindigkeitsfotografie) gemessene Maximalradien den Ergebnissen der Simulation gegenübergestellt, die wiederum mit leicht erniedrigtem P_2 am besten passen. Zusammenfassend zeigt sich, dass die systematisch gewonnenen Daten für Zwei-Frequenz-Anregung hinreichend gut durch die Modellierung wiedergegeben werden können. Die Verschiebung der Blase vom Zentrum konnte (anders als in [3,9]) vernachlässigt werden. Eine Erhöhung der Lichtausbeute im Vergleich zu rein sinusförmiger Anregung konnte beobachtet werden, war aber nicht sehr ausgeprägt und hing recht stark vom Gasgehalt des Wassers ab.

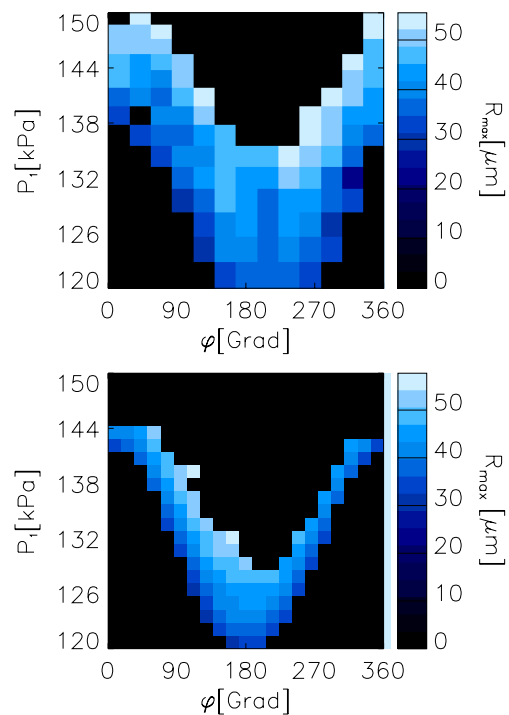


Abb.3: Gemessene Maximalradien bei $P_2 \approx 30$ kPa (oben) und Simulationsergebnisse bei $P_2 = 20$ kPa (unten).

Literatur

- [1] D.F. Gaitan, L.A. Crum, C.C. Church & R.A. Roy, J. Acoust. Soc. Am. **91**, 3166 (1992).
- [2] R. Mettin, J. Holzfuss & W. Lauterborn, *Fortschritte der Akustik - DAGA 95*, 1147 (1995).
- [3] R. Mettin & J. Holzfuss, *Fortschritte der Akustik - DAGA 96*, 420-421 (1996); J. Holzfuss, M. Rüggeberg & R. Mettin, Phys. Rev. Lett. **81**, 1961 (1998).
- [4] D. Krefting, Diplomarbeit, Universität Göttingen, 1999.
- [5] D. Lohse & S. Hilgenfeldt, J. Chem. Phys. **107**, 6986 (1997).
- [6] M.M. Fyrillas & A.J. Szeri, J. Fluid Mech. **277**, 381 (1994).
- [7] M. Brenner, D. Lohse & T.F. Dupont, Phys. Rev. Lett. **75**, 954 (1995).
- [8] D.F. Gaitan & R.G. Holt, Phys. Rev. E **59**, 5495 (1999).
- [9] J.A. Ketterling & R.E. Apfel, J. Acoust. Soc. Am. **107**, 819 (2000).