

Optimierte akustische Anregung der Sonolumineszenz

ROBERT METTIN und JOACHIM HOLZFUSS

Institut für Angewandte Physik, TH Darmstadt, Schloßgartenstr. 7, 64289 Darmstadt

Einleitung

Bereits in [1] wurde vorgeschlagen, Kavitation durch anharmonische Schallsignale zu verstärken. In Rechnungen konnte gezeigt werden, daß der Kollaps einer im akustischen Stehwellenfeld gefangenen Einzelblase bei gleicher Schalleistung heftiger wird, wenn von einer sinusförmigen Stehwelle abgewichen wird. Die passenden Amplituden und Phasen der höherharmonischen Anteile wurden in einem Optimierungsprozeß ermittelt, der sich an dem minimal erreichten Blasenradius orientierte. Hintergrund der optimierten Stehwellenanregung ist die Einzelblasen-Sonolumineszenz (SBSL), bei der Schallenergie in äußerst kurze Lichtblitze von weniger als 50 Picosekunden Dauer umgewandelt wird [2,3]. Um die Lichtausbeute bei diesem noch immer nicht völlig verstandenen Prozeß zu erhöhen, wurden nun die Rechnungen mit verschiedenen Modellgleichungen fortgesetzt und auch im Experiment eine Zwei-Moden-Anregung realisiert.

Simulation

Für die numerische Optimierung des anregenden Schallsignals wurde das Gilmore-Modell [4] mit einer Koordinatentransformation aus [5] benutzt. Die Berechnungen wurden ohne und mit einem hard-core van der Waals-Term durchgeführt. Der Anregungsdruck P_e wurde jeweils als Fourier-Summe angesetzt: $P_e(t) = P_0 \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi m \nu t + \phi_m)$. Unter der Randbedingung konstanter Schalleistung, $\sum_{m=1}^M a_m^2 = 1$, wurden die Amplituden a_m und Phasen ϕ_m auf numerischem Wege derart optimiert, daß sich eine periodische Schwingung der Blase mit kleinstem Minimalradius einstellt. Der Schalldruck P_0 wurde auf 1.3 bar, die Grundfrequenz ν der Anregung auf 24.3 kHz festgesetzt, um mit dem Experiment vergleichen zu können. Als Ruheradius der Blase wurde $R_0 = 5 \mu\text{m}$ angenommen. Abbildung 1 zeigt oben die Ergebnisse der Optimierung für das Gilmore-Modell ohne hard-core. Dargestellt sind die besten gefundenen Anregungssignale mit acht bzw. zwei Fourier-Moden sowie zum Vergleich das sinusförmige Signal gleicher Leistung, jeweils über eine Periode. Unten ist das stationäre Schwingungsverhalten der Blase für die drei Fälle gezeigt. Einem kleineren Minimalradius entspricht auch ein größerer Maximalradius. Interessanterweise ändert sich die Form der optimalen Anregung fast nicht, wenn ein van der Waals-hard-core über die Zustandsgleichung $p(v-b) = R_g T$, $b = 0.0361/\text{mol}$ berücksichtigt wird ($R_g = \text{Gaskonstante}$). Lediglich die Werte von Minimalradius, Maximaldruck und Maximaltempe-

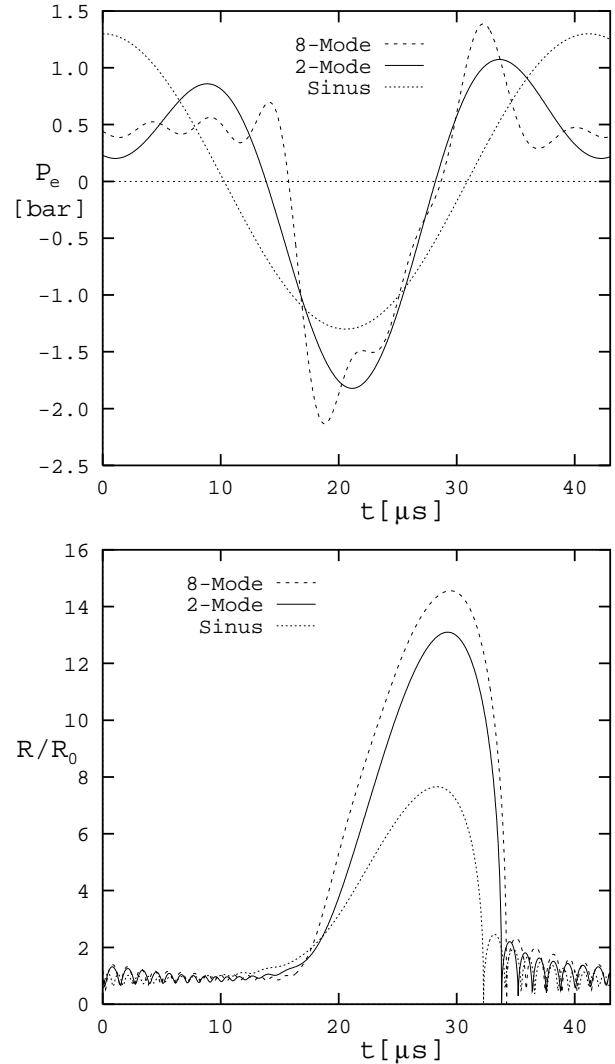


Abb.1: Optimierte Stehwellenanregung einer Einzelblase mit $R_0=5 \mu\text{m}$; Grundfrequenz $\nu=24.3 \text{ kHz}$. Oben: Beste Anregungssignale mit acht bzw. zwei Moden sowie Sinusanregung gleicher Leistung. Unten: Schwingung der Blase bei den entsprechenden Anregungssignalen, durch das Verhältnis R/R_0 dargestellt.

ratur im Kollaps ändern sich. In Tabelle 1 sind die berechneten Werte für harmonische Anregung (1-Mode) sowie für die optimierten 2-Mode- und 8-Mode-Signale gegenübergestellt; darunter stehen die hard-core-Werte (hc). Man sieht einen deutlichen Gewinn schon bei Hinzunahme nur einer höheren Mode. Die Berücksichtigung weiterer Moden scheint sich allerdings nicht besonders auszuzahlen. Vielmehr zeigt sich, daß sich die optimale Anregung bei immer mehr Moden gegen eine Grenzform entwickelt, die nicht mehr stark verändert wird. In Amplitude und Phase der höheren Harmonischen ausgedrückt besitzt das optimierte 2-Moden-Signal die Parameter $a_1=1.026 \text{ bar}$, $a_2=-0.798 \text{ bar}$ und $\phi_2=-13.6^\circ$. Dies kann später mit der im Experiment realisierten Optimierung der 2-Moden-Anregung verglichen werden.

#Md	R_{min}/R_0	P_{max} [bar]	T_{max} [K]
1	0.05631	99462	5203
2	0.03025	1194258	9685
8	0.02726	1810908	10748
1 hc	0.12365	4278	4421
2 hc	0.11878	5023	6919
8 hc	0.11846	5078	7386

Tab.1: Berechnete Werte von Minimalradius, Maximaldruck und Maximaltemperatur im Kollaps bei 1, 2 und 8 optimierten Moden ohne und mit hard-core (hc).

Experiment

Experimentell wurde ein Aufbau mit 2-Moden-Anregung verwirklicht. Aus den numerischen Ergebnissen kann man schließen, daß sich dadurch schon ein großer Gewinn erzielen lassen sollte, während zusätzliche Moden kaum noch weitere Verbesserung bringen dürften. Der Versuchsaufbau ist in Abb.2 dargestellt.

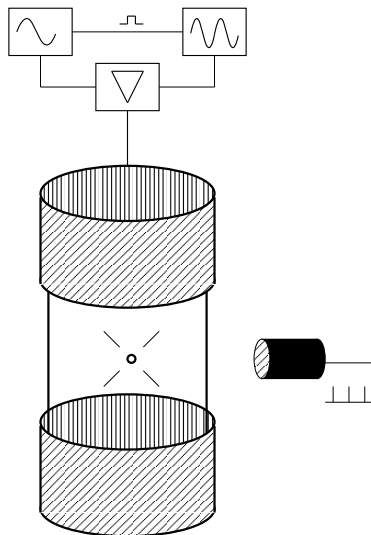


Abb.2: Versuchsaufbau zur 2-Moden-Anregung einer sonolumineszierenden Einzelblase: In einem Stehwellenfeld zwischen zwei piezokeramischen Zylindern wird eine Luftblase in Wasser in der Schwebe gehalten. Die Stehwelle wird aus zwei Frequenzen, ω und 2ω , gemischt (oben). Ein Photomultiplier (rechts) mißt die Anzahl der von der Blase kommenden Photonen.

Das 2-Moden-Signal mußte so eingestellt werden, daß eine Blasenschwingung mit Sonolumineszenz stabil war. Das war nicht bei beliebigen Gesamtleistungen möglich. Auch ein harmonisches Anregungssignal ist unter diesen Bedingungen leistungsbeschränkt. Die maximale Lichtausbeute mit sinusförmiger Anregung wurde bei einer Druckamplitude von 1.3 bar erzielt – bei höheren Drücken wurde die Einzelblase instabil. Es zeigte sich, daß die 2-Moden-Signale stärkeren Beschränkungen bezüglich ihrer Schalleistung unterworfen sind. Trotzdem konnte die Photonenausbeute deutlich gesteigert werden: Bei nur etwa 30% der Sinus-Leistung

und einer Phasenverschiebung von ca. 53° wurden 50% mehr Photonen gemessen. Mit einem Hydrophon gemessene Schallsignale des experimentell optimierten 2-Moden-Signals und des 1.3 bar Sinus-Signals sind in Abb.3 gezeigt.

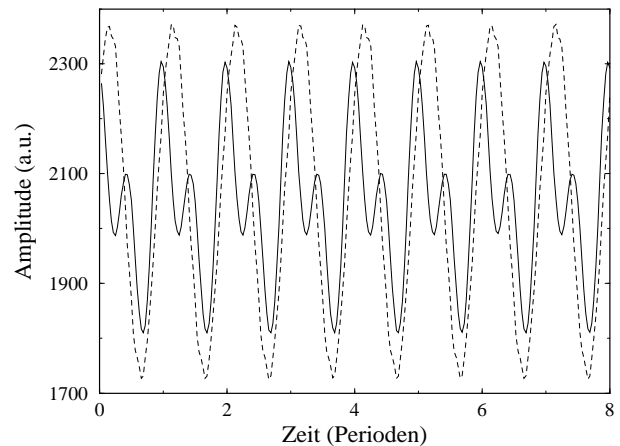


Abb.3: Gemessener Druckverlauf an der Stelle der Blase: Sinus-Signal (gestrichelt) und optimiertes 2-Moden-Signal (durchgezogen). Die Leistung der zwei Moden beträgt nur etwa 30% des Sinus.

Abschließend läßt sich feststellen, daß die absolute Lichtausbeute in dem experimentellen Resonatoraufbau durch 2-Moden-Anregung um den Faktor 1.5 gegenüber Sinus-Anregung gesteigert werden konnte. Es ist dabei außerdem zu berücksichtigen, daß die Leistung des 2-Moden-Signals nur bei einem Drittel des Sinus-Signals lag. Tendenziell stimmt auch ein Vergleich mit der Numerik, sowohl in der Voraussage, daß durch zwei Moden eine Verbesserung der Lichtausbeute erzielt werden kann, als auch in der ungefähren Form des gemischten Anregungssignals (vgl. Abb.1 und Abb.3).

Literatur

- [1] R. Mettin, J. Holzfuß & W. Lauterborn, "Optimierte Anregung von Kavitationsblasen durch anharmonische Ultraschallsignale", Fortschritte der Akustik - DAGA 95, Hrsg. W. Arnold und S. Hirsekorn, 1147-1150 (1995).
- [2] J. Holzfuß, R.G. Holt, D.F. Gaitan & A.A. Atchley, "Sonolumineszenz oszillierender Blasen: Untersuchungen zu einem neuen Phänomen", Fortschritte der Akustik - DAGA '93, Bad Honnef: DPG GmbH, 329-332, (1993).
- [3] R.G. Holt, D.F. Gaitan, A.A. Atchley & J. Holzfuß, "Chaotic sonoluminescence", Phys. Rev. Lett., **72**(9), 1376-1379 (1994).
- [4] T.G. Leighton, *The Acoustic Bubble* (Academic Press, London, 1994).
- [5] U. Parlitz, V. Englisch, C. Scheffczyk & W. Lauterborn "Bifurcation structure of bubble oscillators", J. Acoust. Soc. Am. **88**(2), 1061-1077 (1990).