

Optimierte Anregung von Kavitationsblasen durch anharmonische Ultraschallsignale

ROBERT METTIN, JOACHIM HOLZFUSS und WERNER LAUTERBORN*

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

*Drittes Physik. Institut, Universität Göttingen, Bürgerstr. 42–44, 37073 Göttingen

Einleitung

Üblicherweise werden für die Erzeugung von Kavitation harmonische Ultraschallsignale in Betracht gezogen. Die reichhaltige Dynamik einzelner Gasblasen unter sinusförmiger Anregung ist inzwischen auch gut dokumentiert (siehe z.B. [1] und dort zitierte Arbeiten). In manchen Fällen kann allerdings eine anharmonische Schallanregung gewünschte Effekte verbessern oder gar erst ermöglichen. In dieser Arbeit möchten wir zeigen, daß die periodische Anregung einer Einzelblase durch akustische Stehwellen sowie die Anregung transienter Kavitation optimiert werden können. Ersteres wird durch spezifische Beimischung höherer Fouriermoden, letzteres durch Frequenzwobbeln (“down-sweep”) erreicht.

Die Ergebnisse basieren auf numerischer Simulation von Einzelblasenschwingungen. Die benutzte Modellgleichung (eine Modifikation des Keller-Miksis-Modells; siehe [1]) beschreibt die Radialschwingung einer schallangeregten sphärischen Gasblase in Wasser; dabei ist die Dämpfung durch Schallabstrahlung in Näherung enthalten:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= U \\ \dot{U} &= \left[-\frac{U^2}{2} \left(3 - \frac{U}{c} \right) + \left(1 + (1 - 3\kappa) \frac{U}{c} \right) \left(\frac{P_{stat} - P_v}{\rho} + \frac{2\sigma}{\rho R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\kappa} - \frac{2\sigma}{\rho R} - \frac{4\mu U}{\rho R} \right. \\ &\quad \left. - \left(1 + \frac{U}{c} \right) \frac{P_{stat} - P_v + P_e}{\rho} - R \frac{\dot{P}_e}{\rho c} \right] \left[\left(1 - \frac{U}{c} \right) R + \frac{4\mu}{\rho c} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

R ist der Blasenradius, U die Geschwindigkeit der Blasenwand, R_0 der Gleichgewichtsradius und P_e das externe Schallsignal. Als Konstanten werden benutzt: $P_{stat} = 100kPa$ (statischer Druck), $P_v = 2.33kPa$ (Dampfdruck), $\sigma = 0.0725N$ (Oberflächenspannung), $\rho = 998kg/m^3$ (Flüssigkeitsdichte), $\mu = 0.001Ns/m^3$ (Viskosität), $c = 1500m/s$ (Schallgeschwindigkeit) und $\kappa = 4/3$ (Verhältnis der spezifischen Wärmen des Gases).

Optimierte Stehwellenanregung

In vielen Experimenten wird eine Einzelblase im Zentrum eines Stehwellenfeldes gehalten, das z.B. mittels eines Piezo-Resonators erzeugt wird. Die Schallintensitäten erreichen am Blasenort sehr hohe Werte, so daß beispielsweise Sonolumineszenz (SL) beobachtet werden kann (siehe [2,3] und enthaltene Referenzen). Im folgenden wird nun versucht, durch geschickte Beimischung höherer Fourier-Moden zu dem zunächst sinusförmigen Stehwellensignal die Dynamik der Blase in Bezug auf SL zu optimieren, d.h. den kleinsten während einer Anregungsperiode erreichten Radiuswert zu minimieren. Hierbei spielen nur ungerade Vielfache der Resonatorfrequenz, diese aber mit eventuellem Phasenshift, am Blasenort eine Rolle. Das liefert bei Mitnahme der $(2N+1)$ -ten Harmonischen ein Anregungssignal der Form

$$P_e(t) = P_0 \sum_{n=0}^N r_{2n+1} \cos((2n+1)2\pi\nu t + \phi_{2n+1}). \quad (2)$$

Als Randbedingung fordern wir äquivalente Leistung aller Signale (2), d.h. $\sum_{n=0}^N r_{2n+1}^2 = 1$. Jedem beliebigen Parametersatz r_{2n+1} und ϕ_{2n+1} , $n = 1 \dots N$ kann jetzt, je nach kleinstem erreichten Radius, eine Güte zugeordnet werden. Ein Suchalgorithmus versucht nun, im zugelassenen Parameterraum ein Optimum an Güte, also einen minimalen erreichbaren Radius zu finden. Das Ergebnis ist ein anharmonisches Anregungssignal, dessen Blasenkomprimierung im Verhältnis zu einem sinusförmigen Signal äquivalenter Leistung optimiert wurde.

Als Beispiel zeigen wir in Abb. 1 das Verhalten einer Blase ($R_0 = 10\mu m$) bei sinusförmigem und bei optimiertem anharmonischem Signal. Die Grundfrequenz beträgt $\nu = 23.0kHz$, das optimierte Signal besitzt die zusätzlichen Frequenzen 3ν , 5ν und 7ν . Der kleinste erreichte Radius der Blase konnte um ca. 15% verkleinert werden.

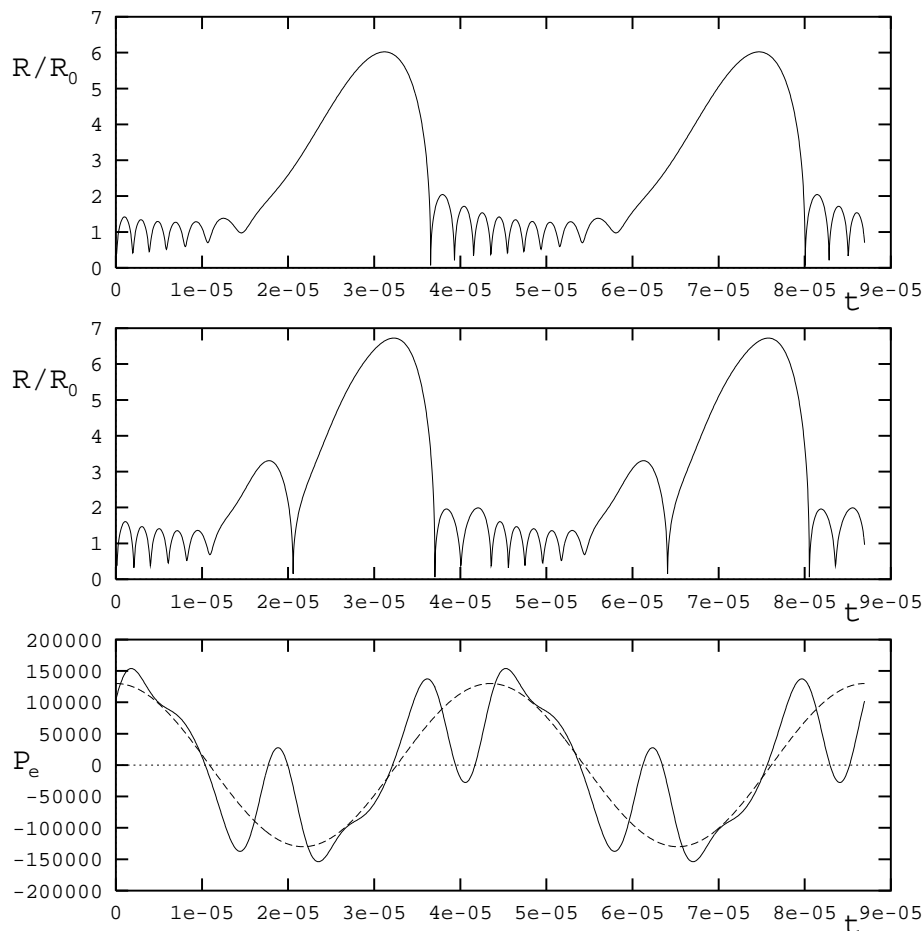


Abbildung 1: *Optimierte Stehwellenanregung einer Kavitationsblase mit $R_0 = 10\mu m$. Oben: Schwingungsverlauf bei harmonischer Anregung; $R_{min} = 0.68\mu m$. Mitte: Blasenverhalten bei optimiertem Anregungssignal; $R_{min} = 0.57\mu m$. Unten: harmonisches (gestrichelt) und optimiertes Schallsignal äquivalenter Leistung (Zeiten in Sekunden, Schalldruck in Pascal).*

Optimierte Anregung transientser Kavitation

Möchte man eine möglichst starke Schwingung einer Kavitationsblase bei transienter, d.h. nur kurzzeitiger Schallanregung erreichen, so liegt eine Anregung mit der Resonanzfrequenz ν_0

der Blase nahe. Da es sich allerdings um einen nichtlinearen Schwinger mit “weichem” Charakter handelt, hängt die Resonanzkurve einer Blase zu tiefen Frequenzen hin über. Geht man von einer anfangs ruhenden Blase aus, so läßt sich durch harmonische Anregung mit ν_0 das Amplitudenmaximum i.d.R. nicht erreichen (da es mit einer niedriger liegenden Schwingung koexistiert). Wird die Frequenz allerdings von einem Wert größer als ν_0 heruntergefahren, so kann man dem oberen Resonanzast bis zum Gipfel folgen (dies ist auch ein Effekt bei optimaler Anregung nichtlinearer Schwinger gemäß [4]). In der Tat zeigt sich, daß Einzelblasen mit einem fallenden Frequenzsweep schnell zu ihren maximalen Resonanzschwingungen gebracht werden können. Die Form des Frequenzsweeps kann nun für verschiedene Belange optimiert werden. Möchte man z.B. in möglichst kurzer Zeit eine einzelne Blase definierter Größe in Resonanz fahren, so ist eine Frequenzverschiebung mit kubischer Zeitabhängigkeit $\nu(t) = \nu_1 - \alpha t^3$ einem linearen Sweep überlegen (siehe [5]). Betrachtet man dagegen ein Ensemble von Blasen mit einer Verteilung von Radien, die möglichst alle stark angeregt werden sollen, so kommt man auf eine Frequenzänderung mit reziproker Zeitabhängigkeit: $\nu(t) = \eta/(t_0 + t)$. Hierbei wird die Eigenfrequenz-Radius-Beziehung $\nu_0 R_0 \approx 3$ aus [6] benutzt; η ist innerhalb gewisser Grenzen wählbar.

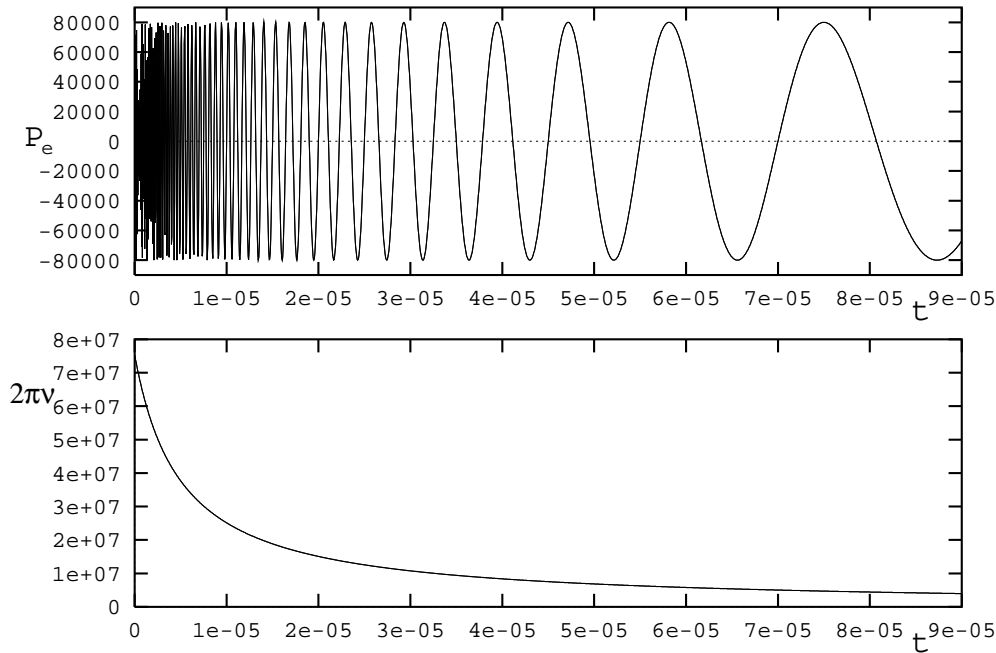


Abbildung 2: Frequenzveränderliches Anregungssignal (Abwärtssweep) für transiente Kavitation. Oben: Schallsignal (in Pa). Unten: Momentanfrequenz (in $2\pi\text{Hz}$).

Abbildung 2 zeigt einen solchen zeitreziproken Abwärtssweep, wobei der Anregungsschall $P_e(t) = P_0 \sin(2\pi\nu(t)t)$ und dessen Momentanfrequenz $\nu(t)$ angegeben sind. Es wurde ein Blasenensemble mit einer Radiusverteilung von $1\mu\text{m}$ bis $20\mu\text{m}$ angenommen (woraus sich Anfangs- und Endfrequenz bzw. der Parameter t_0 und die Sweepdauer berechnen lassen). Der Parameter η wurde auf 60 gesetzt.

In Abb. 3 sind die transienten Blasenschwingungen für das Ensemble zusammengefaßt: Im linken Teilbild entspricht die horizontale Achse der Zeit t nach Einsetzen des Sweeps, während die Ruheradien R_0 in der Vertikalen dargestellt sind. Die Schwingungen $R(t)/R_0$ sind grauwertcodiert aufgetragen: helle Bereiche entsprechen großen Auslenkungen, dunkle Kompres-

sionen. Alle Blasen werden im Laufe des Sweeps in Resonanz gefahren, was bei Einzelfrequenzanregung nicht der Fall wäre. Das rechte Teilbild von Abb. 3 zeigt dasselbe höhencodiert.

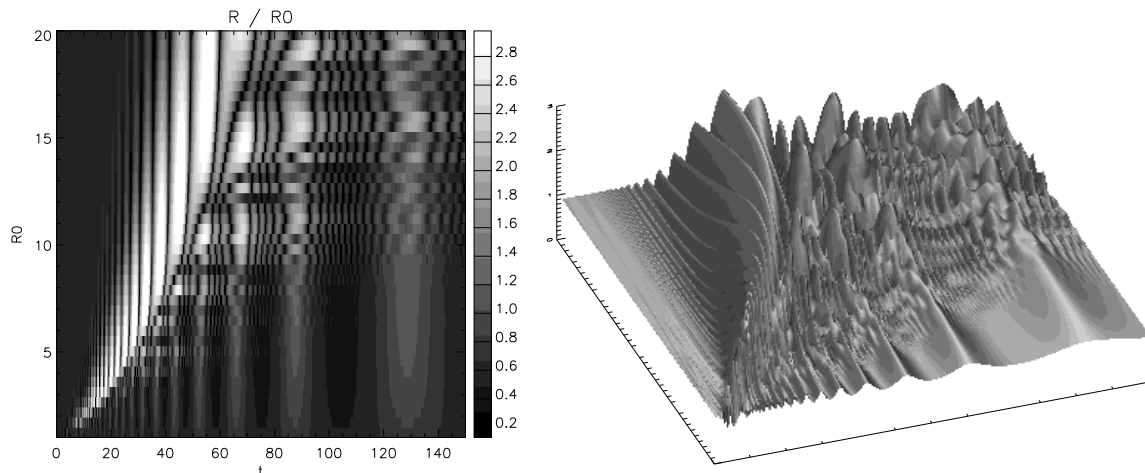


Abbildung 3: Grauwert- bzw. höhencodierte transiente Schwingungsantworten auf das frequenzveränderliche Anregungssignal aus Abb. 2. Anfangsradius R_0 in μm , Zeit t in μs , Grauwerte bzw. Höhen: R/R_0 .

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß Ultraschallanregung von Kavitationsblasen optimiert werden kann, wenn anharmonische Schallsignale Anwendung finden. Für den Fall einer Einzelblasenanregung im Resonator konnte durch spezifisches Einbeziehen höherer Fouriermoden in ein periodisches Signal die Blasenkompression bei gleicher Anregungsleistung erhöht werden. Dies ist wegen der Erhöhung des Kollapsdruckes u.a. interessant für die Erzeugung und Untersuchung von Sonolumineszenz. Weiterhin konnte durch eine zeitreziproke Frequenzvariation der Anregung (down-sweep) die transiente Kavitation in einem Blasenensemble verschiedener Radien verbessert werden. Anwendungen hierfür liegen in den Gebieten Sonochemie und Entkeimung, wo man z.B. in schnell fließenden Flüssigkeiten ein Maximum an Kavitationswirkung erzielen möchte.

Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert (SFB 185).

Literatur

- [1] U. Parlitz, V. Englisch, C. Scheffczyk, W. Lauterborn, "Bifurcation structure of bubble oscillators", *J. Acoust. Soc. Am.* **88**(2), 1061-1077 (1990).
- [2] J. Holzfuss, R.G. Holt, D.F. Gaitan, A.A. Atchley, "Sonolumineszenz oszillierender Blasen: Untersuchungen zu einem neuen Phänomen", in: 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] A. Hübler, E. Lüscher, "Resonant stimulation and control of nonlinear oscillators", *Naturwissenschaften* **76**, 67-69 (1989).
- [5] R. Mettin, J. Holzfuss, W. Lauterborn, in Vorbereitung.
- [6] F.R. Young, *Cavitation* (McGraw-Hill, London, 1989).