

Akustische und räumliche Strukturbildung in Ultraschall-Kavitationsfeldern

D.Krefting, R. Mettin, U.Parlitz, W.Lauterborn

Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Bürgerstr. 42-44, 37073 Göttingen

e-mail:d.krefting@dpi.physik.uni-goettingen.de

Einleitung

In akustischen Kavitationsfeldern, wie sie z.B. in der Ultraschallreinigung verwendet werden, kann im akustischen Spektrum neben dem Auftreten von höheren Harmonischen der über die Schallwandler eingestrahlten Frequenz auch das Anschwingen von subharmonischen Frequenzen und ein hoher Rauschanteil beobachtet werden. Höhere Harmonische der Anregungsfrequenz entstehen unter anderem durch nichtlineares Schwingungsverhalten der Schallwandler bei hohen Auslenkungen. Sie können auch unterhalb der Kavitationsschwelle auftreten. Die Entstehung von Frequenzanteilen mit rationalem oder irrationalem Verhältnis zur Anregungsfrequenz ist bisher jedoch nur bei Anwesenheit von Blasen gemessen worden. Erste Untersuchungen wurden bereits in den 50er Jahren durchgeführt [1]. Eine schwingende Blase im Schallfeld lässt sich im Rahmen der nichtlinearen Dynamik als periodisch getriebener Oszillator beschreiben. Eine einfache Beschreibung der Radialschwingung erhält man aus der Euler-Gleichung an der Blasenwand R in Kugelkoordinaten: die sogenannte *Rayleigh-Plesset-Gleichung*

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = -\frac{[p_\infty - p_i]}{\rho}, \quad (1)$$

mit

R : Radius der Blase

\dot{R} : Blasenwandgeschwindigkeit

\ddot{R} : Beschleunigung der Blasenwand

p_∞ : Druck in der Flüssigkeit in hinreichender Entfernung der Blase

p_i : Druck an der Blasenwand = Blaseninnendruck.

Der Druck in der Flüssigkeit setzt sich im Schallfeld aus dem hydrostatischen Druck p_{hs} und der i. A. vom Ort \underline{r} abhängigen Schallanregung $p_{ak}(\underline{r}, t) = p_s(\underline{r}) \cos(2\pi f_0 \cdot t)$ zusammen:

$$p_\infty(\underline{r}, t) = p_{hs} + p_s(\underline{r}) \cos(2\pi f_0 \cdot t). \quad (2)$$

Qualitativ liefert die Rayleigh-Plesset-Gleichung gute Übereinstimmung mit experimentellen Messungen an Einzelblasen. Ihre numerische Simulation zeigt in verschiedenen Parameterregionen (Ruhradius, Schallfrequenz und -amplitude) koexistierende stationäre Lösungen mit höheren Periodendauern, sowie Periodenverdopplungskaskaden, die in chaotischen Radialschwingungen resultieren. Abbildung 1 zeigt ein Bifurkationsdiagramm des zu einer festen Phasenlage des Anregungssignals bestimmten normierten Radius in Abhängigkeit der Schalldruckamplitude für eine etwas erweiterte Blasengleichung. In experimentellen Einzelblasensystemen konnte Periodenverdopplung bisher nicht gemessen werden, da die entsprechenden Parameterbereiche, insbesondere hohe Schalldruckamplituden, aufgrund von Stabilitätsgrenzen (Diffusion, Oberflächenschwingungen) nicht erreicht wurden.

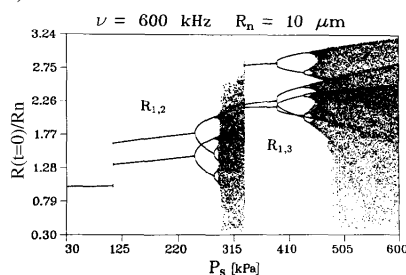


Abbildung 1: Numerisches Bifurkationsdiagramm einer Einzelblase (Keller-Miksis-Modell, Abbildung aus [2]).

Erst in Schallfeldern mit Schalldruckamplituden oberhalb der Kavitationsschwelle treten die beschriebenen Phänomene auf. Dort entstehen an Kavitationskeimen spontan Blasen mit endlicher Lebensdauer. Diese beeinflussen durch Schallabsorption, -streuung und abstrahlung das Schallfeld ihrer Umgebung. Entstehende Blasen können je nach aktueller Konfiguration des Blasenfeldes unterschiedlichste Anfangsbedingungen vorfinden. Durch Wechselwirkung mit dem anregenden Schallfeld und benachbarten Blasen entstehen komplexe raumzeitliche Strukturen. Anhand holografischer Hochgeschwindigkeitskinematografie konnte das gleichzeitige Auftreten von akustischen Subharmonischen und periodenverdoppelter Schwingung einer akustischen Kavitationstruktur gezeigt werden [3]. Kavitation erzeugt jedoch nicht zwangsläufig messbare subharmonische Frequenzanteile. Bei gleichen äußeren Parametern können unterschiedliche akustische Spektren auftreten. Bei Veränderung von Schallfrequenz oder -amplitude treten Hysterese-Effekte auf; das akustische Spektrum weist eine hohe Sensitivität bezüglich des Pfades durch den Parameterraum auf. Dies legt eine enge Verknüpfung von selbstorganisiertem Strukturbildungsprozess und kollektivem Schwingungsverhalten nahe. Durch simultane Aufnahme von Blasenstrukturen und akustischem Spektrum können diese Beziehungen untersucht werden.

Aufbau des Experimentes

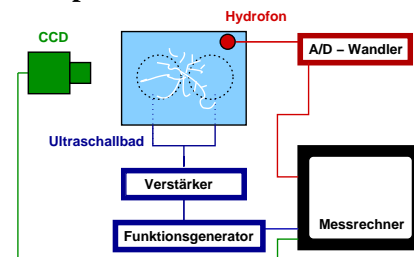


Abbildung 2: Experimenteller Aufbau.

Als Resonatoren werden wassergefüllte Plexiglasquader verwendet, an dessen Unterseite Schallwandler befestigt sind.

Resonator 1: $(16 \times 9 \times 13) \text{ cm}^3$, zwei Schallwandler (Fa. Elma), am Boden mit jeweils drei Schrauben befestigt, Anregungsfrequenz in der ersten Resonanzfrequenz der Wandler, $f_0 = 27 \text{ kHz}$.

Resonator 2: $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$, eine Piezokeramik (PIC 151), am Boden verklebt, Anregungsfrequenz in der ersten Eigenfrequenz des Resonators, $f_0 = 22.4 \text{ kHz}$.

Als Schallempfänger wird ein Hydrofon (Briel & Kjaer 8103) an eine geeignete Stelle im Resonator gebracht. Die Zeitreihe des Schallsignals wird mit einem 16-bit FFT-Analysator (Ono Sokki) digitalisiert. Simultan werden die Blasenstrukturen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (HiSIS 2002) aufgenommen.

Ergebnisse

Messung bei konstanter Schalldruckamplitude

Resonator 1 wird mit vergleichsweise niedriger Wandlerspannung (170 V_{PP}) betrieben. In Abbildung 3 sind die zwei auftretenden Strukturen mit dem dazugehörigen Spektrum abgebildet. Die erste Subharmonische tritt simultan mit einer an einer der Befestigungsschrauben ausgebildeten Blasenstruktur auf (a). Diese bildet eine Art Hemisphäre um den Schraubenkopf. Mithilfe eines Stabes kann diese Struktur gezielt zerstört (b) oder induziert werden. Dabei verschwin-

det bzw. erscheint die erste Subharmonische reproduzierbar.

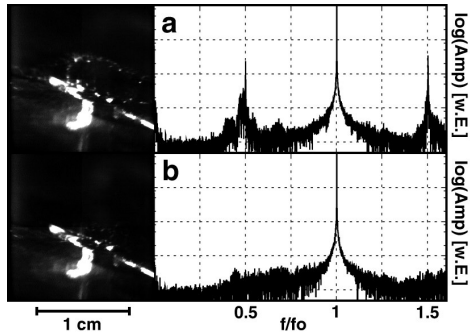


Abbildung 3: Verschiedene Streamerkonfigurationen (links) und zugehöriges Spektrum (rechts) bei gleicher Schallwandlerspannung.

Bei höheren Schallamplituden ($320 V_{PP}$) bildet sich in diesem Resonator meist hörbar die Subharmonische aus, gleichzeitig bilden sich im Flüssigkeitsvolumen typische Doppellagenstrukturen aus. Durch Rühren kann die Kavitationsstruktur zerstört werden, dabei verschwindet auch die Subharmonische aus dem Spektrum. Bei der Restrukturierung schwingt sie wieder an.

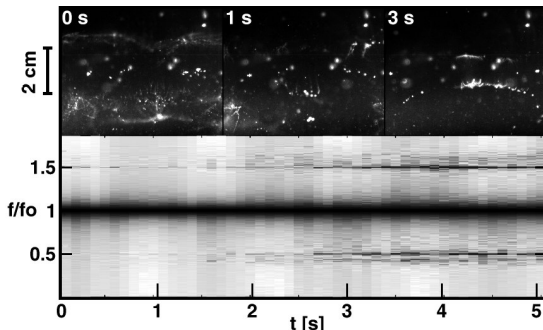


Abbildung 4: Kurzzeitspektren (unten) während der Reorganisation einer gestörten Kavitationsstruktur (oben) in Resonator 1.

In Abbildung 4 ist der zeitliche Verlauf von Kurzzeitspektren bei der Reorganisation des Kavitationsfeldes dargestellt. Kurz nach dem Umrühren ($t = 0$ s) bilden sich Blasenschleier, die Subharmonische ist nicht oder nur sehr schwach zu sehen. Im weiteren Verlauf strukturieren sich die Blasen um, die Schleier lösen sich auf ($t = 1$ s). Es bilden sich Doppellagen-Strukturen ($t = 3$ s), zeitgleich schwingt die Subharmonische stark an.

Akustisches Spektrum bei linearer Amplitudenmodulation

Bei konstantem Anstieg der Piezospannung konnten mithilfe von Kurzzeitspektren Periodenverdopplungskaskaden gemessen werden [4]. Auch hierbei stellte sich heraus, dass die gemessenen Spektren sich in der individuellen Versuchsdurchführung stark unterscheiden können. Neben den zu erwartenden verdoppelnden Perioden $T_n = T_0 \cdot 2^n$ traten auch andere Perioden ($3T_0, 5T_0, \dots$) auf. Auch der zeitliche Verlauf des Spannungsanstieges scheint eine Rolle zu spielen [5]. Diese Beobachtung legt ein kollektives Verhalten der Blasen als Hauptquelle der subharmonischen Moden nahe. Wie bereits oben gezeigt, können bei gleichen äußeren Parametern die Blasenstrukturen verschiedene Konfigurationen annehmen. In der Terminologie der nichtlinearen Dynamik kann man von koexistierenden Attraktoren für das Gesamtsystem reden, wobei es in der jeweiligen Realisation von der zufälligen oder durch bereits durchgeführte Experimente vorgegebenen Blasenverteilung abhängt, welche Konfiguration erreicht wird. Zur Untersuchung der Amplitudenmodulation wurde Resonator 2 verwendet. Bei konstanter Schalldruckamplitude konnte die Subharmonische im Unterschied zum größeren Resonator 1 nicht beobachtet werden, wohl aber bei Modulation der Amplitude. Im hier vorgestellten Experiment wurde die Spannung am Schallwand-

ler linear in 1 s auf $1.8 kV_{PP}$ heraufgefahren. Anschließend wurde die Spannung in gleicher Geschwindigkeit heruntergefahren. Abbildung 5 zeigt das kurzzeitige Anschwingen der Subharmonischen bei Erhöhung der Wandlerspannung. Am Resonatorboden bildet sich eine Kavitationsstruktur (a). Bei weiterer Erhöhung der Amplitude löst sich das Zentrum der Struktur vom Boden ab, dabei schwingt die Subharmonische stark an (b,c). Anschließend reißt die Struktur auf und das Zentrum des Resonators wird von Blasen entvölkert (d). Die Subharmonische wird verrauschter und verschwindet im weiteren Verlauf wieder. Bei der Erniedrigung der Wandlerspannung bildet sich diese Struktur nicht, dort kann keine Subharmonische beobachtet werden.

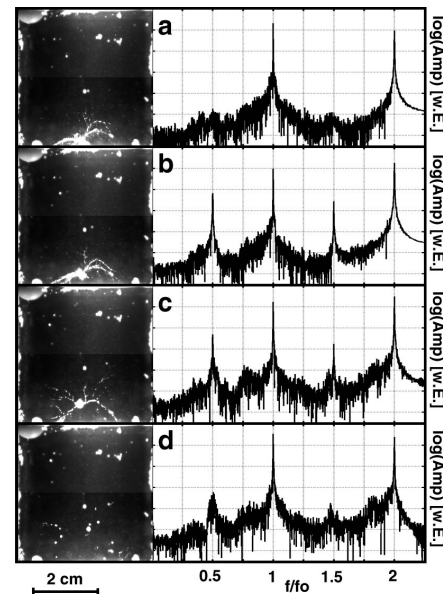


Abbildung 5: Kavitationsstrukturen (links) und Spektren (rechts) bei linearer Amplitudenerhöhung in Resonator 2. Bildabstand: 50 ms. Spannung am Schallwandler: $1060 V_{PP}$ (a) - $1330 V_{PP}$ (d).

Zusammenfassung

Subharmonische der Anregungsfrequenz treten in Kavitationsfeldern unter verschiedenen Bedingungen auf. Das Auftreten der Subharmonischen ist an bestimmte Blasenstrukturen, beziehungsweise Strukturbildungsprozesse gekoppelt. Neben der hier gezeigten halben Anregungsfrequenz können im Experiment auch eine Vielzahl anderer Linien im Spektrum beobachtet werden. Hier muss genauer untersucht werden, inwieweit es sich um rationale Vielfache der Anregungsfrequenz handelt, die auf nichtlineare Radialschwingungen zurückzuführen sind, oder ob das akustische Spektrum durch andere Prozesse wie Translation der Blasen oder Fragmentationszyklen modifiziert wird.

Literatur

- [1] R. Esche: Untersuchung der Schwingungskavitation in Flüssigkeiten. *Acustica*, Beih. 2 (Heft 4), 208-218, 1952.
- [2] U. Parlitz, V. Englisch, C. Scheffczyk und W. Lauterborn: Bifurcation structure of bubble oscillators. *J. Acoust. Soc. Am.* 88(2), 1061-1077, 1990.
- [3] W. Lauterborn und A. Koch: Holographic observation of period-doubled and chaotic bubble oscillations in acoustic cavitation. *Phys. Rev. A* 35, 1974-1976, 1987.
- [4] W. Lauterborn und E. Cramer: Subharmonic Route to Chaos observed in Acoustics. *Phys. Rev. Lett.* 47, 1445-1448, 1981.
- [5] J. Holzfuß, Dissertation, Universität Göttingen, 1987.