

Frequenzskalierung von Doppelschicht-Kavitationsstrukturen

T. Nowak¹, R. Mettin^{1,*}, W. Lauterborn¹, F. Holsteyns²

¹ *Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Deutschland*

² *SEZ AG, SEZ-Straße 1, 9500 Villach, Österreich*

* *Email: R.Mettin@physik3.gwdg.de*

Einleitung

Erst in jüngster Zeit wurden größere Anstrengungen unternommen, die akustische Kavitation [1, 2] in ihren unterschiedlichen Erscheinungsformen sowie deren Eigenschaften und Aktivitäten zu klassifizieren [3]. Einen wichtigen Aspekt bilden hierbei die Skalierungseigenschaften der Kavitationsstrukturen unter Parametervariation, insbesondere bei Schallfrequenzveränderung. Man weiß zwar, dass mit zunehmender Frequenz die beobachteten Blasengrößen abnehmen, ebenso wie z.B. die Erosionsaktivität. Da jedoch die Kavitationsstrukturen Ergebnis eines komplizierteren Zusammenspiels verschiedener Größen und Phänomene sind (u.a. von Schallfeld, Blasenoszillationen, Bjerkneskräften, Diffusionsvorgängen und Instabilitäten [4]), greifen einfache Erklärungen meist zu kurz. Als Beispiel sei der lineare Resonanzradius genannt, der zwar auch mit steigender Frequenz kleiner wird, aber z.B. für viele Kavitationsereignisse im Bereich 20 kHz gar keine entscheidende Rolle spielt, weil die beobachteten aktiven Blasen sämtlich deutlich kleiner sind [3]. Entsprechend muss zunächst versucht werden, die entscheidenden Mechanismen der Strukturbildung zu erkennen und zu verstehen, bevor man möglicherweise gezielt darauf Einfluss nehmen kann. Hierzu sind oft weitere experimentelle Beobachtungen nötig. Dies gilt insbesondere für die Frage, ob und wie die akustische Kavitation sich bei Frequenzvariation quantitativ und eventuell auch qualitativ ändert. Findet man z.B. Bereiche mit im strukturellen Sinne *ähnlicher* Kavitation, so kann man daraus Rückschlüsse über die verantwortlichen Mechanismen ziehen. Nachdem bereits über Strukturähnlichkeiten in abklingenden laufenden Wellen (an Sonotroden spitzen) berichtet wurde [5], zeigen wir hier die Beobachtung einer Strukturähnlichkeit in Stehwellenfeldern.

Doppelschicht-Struktur

Bei Kavitation im Bereich von 20 bis 40 kHz wurde eine als *Jellyfish* bezeichnete Doppelschicht-Struktur dokumentiert und untersucht [6, 7, 8]. Sie ist in Abbn. 1 und 2 gezeigt und besteht aus zwei Blasenschichten, die symmetrisch auf beiden Seiten einer Schalldruckknoten-ebene angeordnet sind. Die Blasen in den jeweiligen Schichten schwingen entsprechend antiphasisch zueinander (vgl. Abb. 2). Der Abstand der Schichten ist etwas kleiner als $\lambda/4$. Dazwischen laufen kleine Blasen von der Knotenzone in die Schichten hinein und größere Blasencluster in entgegengesetzter Richtung zu den Knoten. Teilweise scheint es zum Blasaustausch zwischen den Schichten zu kommen.

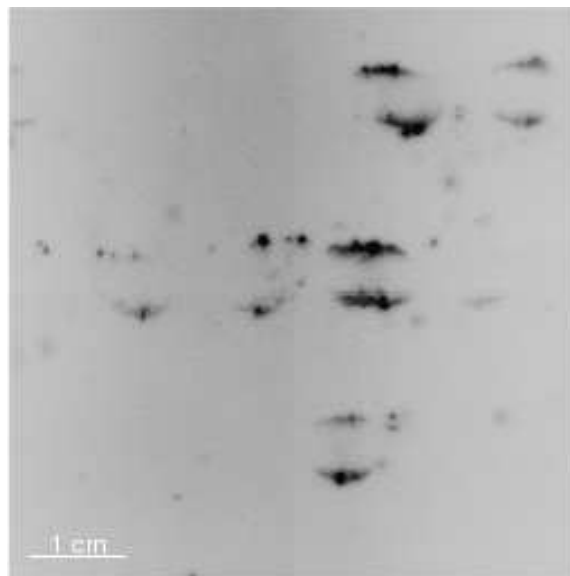


Abbildung 1: Doppelschicht-Strukturen in einem 40 kHz-Resonator (Langzeitbelichtung mit Streulicht, invertierte Darstellung).

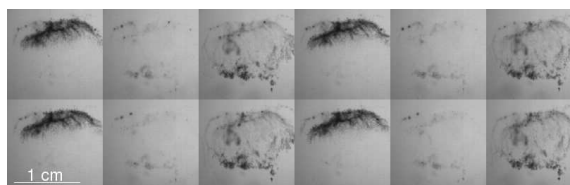


Abbildung 2: Kurzzeitbelichtungen einer Doppelschicht-Struktur bei 40 kHz (30.000 Bps, $2\mu s$ Belichtungszeit). Nach 3 Bildern sind 4 Schallfeldperioden vergangen.

Beobachtungen bei höheren Frequenzen

Ein Stehwellenfeld bei 113 kHz wurde zwischen einer Sonotroden spitze von 1 cm Durchmesser und dem Boden einer Glasküvette erzeugt. Auch hier wurden Doppelschichtstrukturen beobachtet, siehe die eingblendete Aufnahme in Abb. 3 und die Sequenz in Abb. 4. Da das Stehwellenfeld unter der Sonotrode nicht ausgemessen werden konnte, wurde es mit FEM berechnet, was auch in Abb. 3 gezeigt ist. Der Abstand der Knoten beträgt in dem simulierten Feld etwa $3\lambda_{113}/4$ in vertikaler und etwa λ_{113} in horizontaler Richtung. Die beobachteten Doppelschichten bilden sich recht genau um die berechneten Knotenflächen aus. Sowohl die Breite als auch der Abstand der Schichten scheinen überproportional mit der Wellenlänge abzunehmen; ihr Abstand beträgt hier etwas weniger als $\lambda_{113}/5$. Die Vergrößerung einer dieser Struk-

turen bei 113 kHz in Abb. 4 zeigt die starke Ähnlichkeit mit Abb. 2. Die Bewegung von größeren Blasen oder Clustern ist zu erkennen, die kleineren Blasen werden allerdings nicht mehr aufgelöst. Von Zeit zu Zeit wechselt die Anordnung der Blasen zu einer ringähnlichen Form, wobei die Schichten jeweils Halbkreise formen und einzelne Blasen auf ringförmigen Bahnen laufen. Dieser Übergang wurde auch bei kleineren Frequenzen für abnehmende Schalldruckamplitude beobachtet [3].

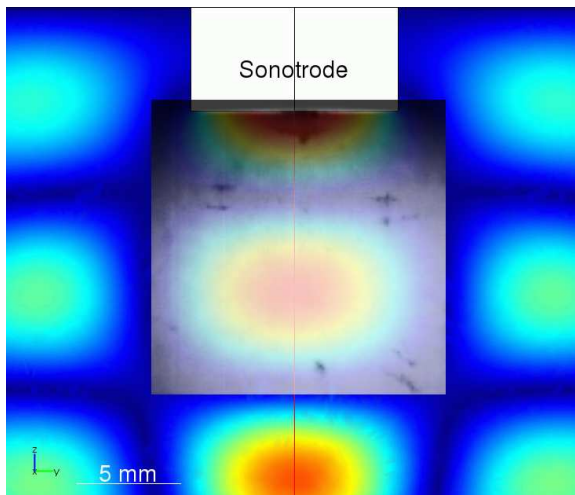


Abbildung 3: FEM-Berechnung des Schallfeldes (Betrag der Schalldruckamplitude) bei 113 kHz mit überlagertem Bild der Blasenstrukturen. Man erkennt die zum Druckknoten symmetrische Anordnung.

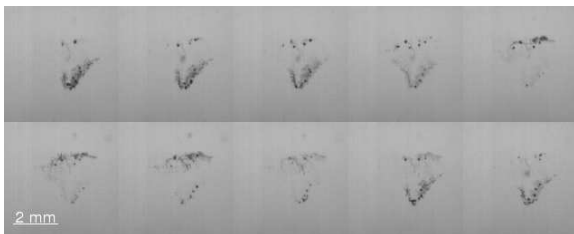


Abbildung 4: Kurzzeitbelichtungen einer Doppelschicht-Struktur bei 113 kHz (60.000 Bps, d.h. Bildabstand ca. 1.9 Perioden; $1\mu s$ Belichtungszeit).

In Stehwellenfeldern bei 230 kHz wurden mit bloßem Auge im Streulicht ebenfalls Strukturen beobachtet, die eine Doppelschichtanordnung zu besitzen scheinen. Es könnte sich allerdings auch um flache oder verkippte ringförmige Anordnungen handeln. In Abb. 5 sieht man zwei abwechselnd aufschwingende Lagen von Blasen. Ähnliche Strukturen sind auch in Abb. 6 gezeigt. Durch die nötige sehr lange Belichtungszeit und die hohe Vergrößerung sind die einzelnen Lagen nur sehr undeutlich zu erkennen.

Diskussion

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Doppelschicht-Struktur in Stehwellen über einen weiten Frequenzbereich beobachtbar ist und zumindest bis zu einigen 100 kHz universellen Charakter zu haben scheint. Dies ist ein weiterer Schritt auf dem Weg zum Verständnis der Strukturbildung und der Skalierbarkeit

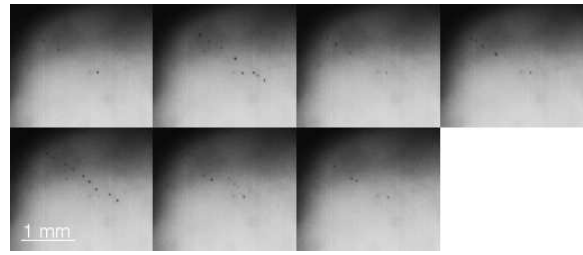


Abbildung 5: Kurzzeitbelichtung einer Doppellagenstruktur bei 230 kHz (30.000 Bps, d.h. Bildabstand ca. 7.7 Perioden; $1\mu s$ Belichtungszeit)(In gedruckter Form kaum zu erkennen).

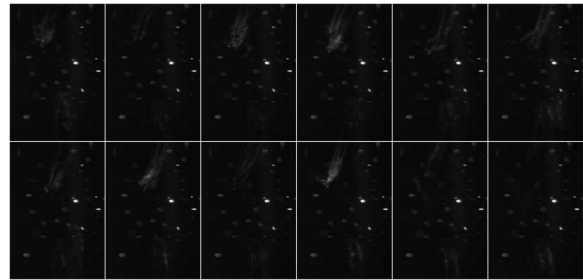


Abbildung 6: Langzeitbelichtung mehrerer Doppellagenstrukturen bei 230 kHz (60 Bps; $1/60$ s Belichtungszeit).

akustischer Kavitation. Es bleibt zu zeigen, inwieweit sich dieses Blasenverhalten zu noch höheren Frequenzen fortsetzt. Hierzu dürften neben experimentellen Beobachtungen auch numerische Simulationen nötig sein, da sich die Blasengrößen oberhalb etwa 300 kHz dem optischen Auflösungsvermögen nähern und allenfalls im Streulicht sichtbar gemacht werden können.

Literatur

- [1] F.R. Young, *Cavitation*, McGraw-Hill 1989.
- [2] T.G. Leighton, *The Acoustic Bubble*, Academic Press 1994.
- [3] R. Mettin, in: A. A. Doinikov (ed.): *Bubble and Particle Dynamics in Acoustic Fields*, Research Signpost, Kerala (India) 2005, 1.
- [4] R. Mettin, in: T. Kurz, U. Parlitz, and U. Kaatz (eds.): *Oscillations, Waves and Interactions*, Universitätsverlag Göttingen, Göttingen, 2007, 171.
- [5] T. Nowak, R. Mettin, W. Lauterborn, in: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2007 Stuttgart*, DEGA, Berlin, 2007, 125.
- [6] R. Mettin et al., in: O.V. Rudenko and O.A. Sapozhnikov (eds.), *Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century*, MSU, Moscow, 2002, vol. 2, 1003.
- [7] R. Mettin et al., *Forum Acusticum Sevilla*, Special Issue of the *Revista de Acustica*, Vol. XXXIII, 2002, ULT-02-004-IP.
- [8] A. Otto, R. Mettin, W. Lauterborn, in: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2007 Stuttgart*, DEGA, Berlin, 2007, 127.