

Kräfte in akustischen Kavitationsfeldern

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

In akustischen Kavitationsfeldern, wie sie z.B. in der Ultraschallreinigung verwendet werden, bilden die entstehenden Blasen komplexe raumzeitliche Strukturen. In Systemen mit einzelnen oder wenigen Blasen können die zugrundeliegenden Kraftgesetze in überschaubarem Rahmen bestimmt werden. In dieser Arbeit werden Trajektorien einzelner Blasen untersucht und mit einem einfachen Modell verglichen unter Berücksichtigung verschiedener Ansätze für die Reibungskraft.

Einleitung

In akustischen Stehwellenfeldern wirkt auf Blasen in Flüssigkeiten neben der Auftriebskraft die sogenannte primäre Bjerkneskraft, eine durch den oszillierenden Druckgradienten verursachte Nettokraft, die in einem weiten Parameterbereich im Schalldruckbauch anziehend ist. Sind weitere Blasen anwesend, so wird die Bewegung der Blase wesentlich von den Wechselwirkungskräften der Blasen untereinander beeinflusst [1,2]. Bei der raumzeitlichen Modellierung von akustischen Kavitationsphänomenen kann ein Partikelmodell verwendet werden, das die Bewegungsgleichungen individueller Blasen im Schallfeld integriert [2]. Ein Vergleich mit dem Experiment ist schwierig, da dort die Wirkungen einzelner Kräfte meist nicht separat zugänglich sind. Insbesondere die Reibungskraft ist eine schlecht zu bestimmende Größe. Bei nichtkonstanten Reynoldszahlen, die oft von der Größenordnung 1 sind, und der Unkenntnis der realen Randbedingungen an der Blasenwand sind theoretische Vorhersagen schwierig. Für aufsteigende Gasblasen ist das empirische Gesetz von Langmuir-Blodgett gültig, das für harte Kugeln bis zu Reynoldszahlen von 100 aufgestellt worden ist und im Grenzfall kleiner Reynoldszahlen in die Stokes'sche Reibung übergeht [3]. Magnaudet und Legendre [4] haben in einer theoretischen Arbeit eine Übereinstimmung der Reibungskraft für die Translation oszillierender Blasen mit der von Gasblasen konstanten Radius bei hohen Reynoldszahlen ermittelt. Dabei muss mindestens eine der beiden Reynoldszahlen, die mit den beiden charakteristischen Geschwindigkeiten (Translations- und Radialgeschwindigkeit) gebildet werden, groß sein. In dieser Arbeit werden zur Bestimmung der Reibungskraft Blasen trajektorien mit Particle Tracking Velocimetry ausgewertet und mit den theoretischen Vorhersagen verglichen.

Experimenteller Aufbau

Als Resonator wurde ein wassergefüllter Plexiglas-Quader (10 cm x 4 cm x 4 cm) verwendet, an den zwei piezokeramische Schallwandler (\varnothing 3.5 cm) gegenüberliegend angekoppelt sind (s. Abb. 1). Die Küvette wurde bei 32.4 kHz in einer (2,1,1)-Mode mit moderaten Schalldruckamplituden (15-30 kPa) betrieben. Es befindet sich ein Schalldruckbauch im Zentrum der Küvette. Verwendet wurde reines Wasser bei

mittlerem Gasgehalt ($c/c_0 \approx 50\%$), dem etwas NaCl zugegeben wurde. Mit Hilfe einer feinen Kupferelektrode (\varnothing 37 μm) wurden durch Elektrolyse Blasen erzeugt. Die Trajektorien wurden mit einer Digitalkamera (HISIS 2002) und einem Zoom-Objektiv/Nahliniensystem (Computar, 12.5-75mm/S+W NL5) aufgenommen. Der Bereich der Elektrode wurde zur Bestimmung des Blasenradius synchron mit einer baugleichen Kamera und einem telezentrischen Objektiv (Rodenstock TL-1-12-215) vergrößert. Zur Beleuchtung wurde hierzu ein LED-Blitz im Durchlicht verwendet, während die Trajektorien im Streulicht eines handelsüblichen Halogenstrahlers (50W, 12V) aufgenommen wurden.

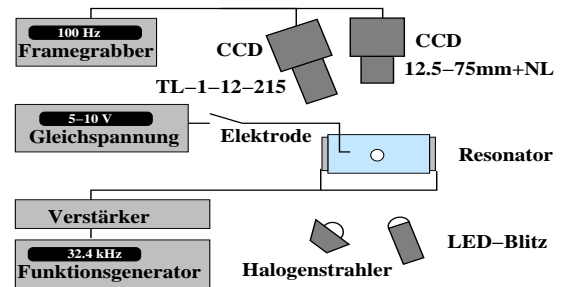


Abb.1: Aufbau des Experimentes.

Ergebnisse

Eine Blase wurde in der Nähe des Schalldruckknotens erzeugt. Die Bewegung der Blase zum Druckbauch hin ist in Abb.2 dargestellt. Zusätzlich ist das Ergebnis der numerischen Simulation wiedergegeben.

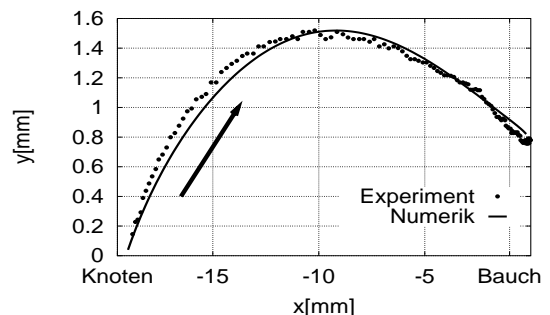


Abb.2: Trajektorie einer Blase mit Ruheradius $R_0(t_0) = 60 \mu\text{m}$ und einer Schalldruckamplitude von 17 kPa im Druckbauch, experimentell und numerisch bestimmt.

Aufgrund des moderaten Schalldrucks im Resonator wurde die Radialoszillation als linear ange-

setzt [1]. Zur Berechnung der Trajektorien wurden die über eine Schwingungsperiode gemittelten Bewegungsgleichungen für eine masselose Blase verwendet [2]. Schalldruckverteilung, -amplitude und Blasenradius in der Nähe der Elektrode wurden durch das Experiment vorgegeben. Die genaue Startposition und der Blasenradius am Ende der Messung wurden im Rahmen der Messgenauigkeit abgeschätzt. Abb.3 gibt die numerischen Trajektorien für verschiedene Startpositionen wieder. Es besteht eine sehr starke Abhängigkeit der Trajektorie von den Anfangsbedingungen, insbesondere in der Nähe des Druckknotens. Auch die Geschwindigkeit der Blase ändert sich stark, wie an den unterschiedlich langen Trajektorien zu erkennen ist.

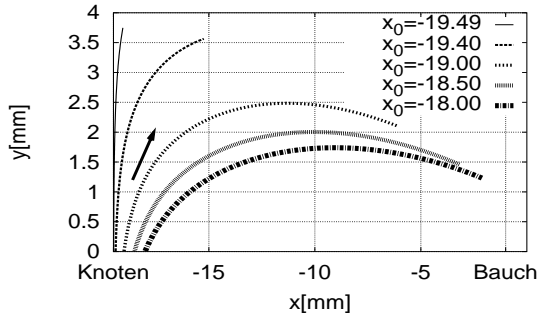


Abb.3: Trajektorien für verschiedene Startpositionen, jeweils 1 Sekunde Laufzeit.

Es wurden verschiedene Ansätze für die Reibungskraft getestet:

$$\text{Stokes: } \underline{F}_d = 6\pi\eta R(t)\underline{v}(t)$$

$$\text{Langmuir: } \underline{F}_d = 6\pi\eta R(t)\underline{v}(t) \times [1 + 0.197(Re)^{0.63} + 2.6 \cdot 10^{-4}(Re)^{1.83}]$$

$$\text{Magnaudet: } \underline{F}_d = 12\pi\eta R(t)\underline{v}(t).$$

In Abb.4 sind sowohl die Trajektorien als auch die Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung für die verschiedenen Modelle bei sonst gleichen Bedingungen dargestellt.

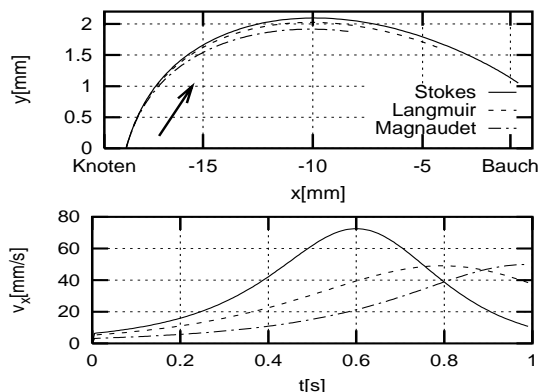


Abb.4: Trajektorien und Geschwindigkeit für verschiedene Reibungskraftmodelle.

Während die Trajektorien sehr ähnlich sind, zeigen sich deutliche Abweichungen in der Geschwindigkeitsverteilung. Die beste Übereinstimmung im zeitlichen Verlauf lässt sich mit dem Ansatz von Magnaudet erzielen. Die Geschwindigkeitskomponenten für Experiment und Simulation sind in Abb.5 wiedergegeben. Die Gültigkeit

der Reibungskraft für hohe Reynoldszahlen ist insofern erstaunlich, als die maximale Reynoldszahl bei 0.6 liegt. Nimmt man jedoch, wie von Magnaudet vorgeschlagen, die Radialgeschwindigkeit als charakteristische Größe, so liegt die Reynoldszahl für die Oszillation um eine Größenordnung darüber. Die Abweichungen des Geschwindigkeitsverlaufs bei Verwendung der Langmuir-Reibung besonders in der Nähe des Schallbauches sind ein weiterer Hinweis darauf, dass die Blasenwandgeschwindigkeit die Reibungskraft für die Translationsbewegung mitbestimmt.

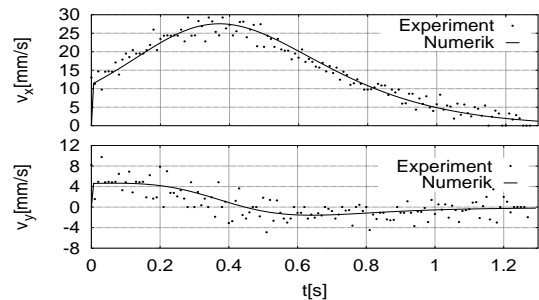


Abb.5: Geschwindigkeitskomponenten aus Experiment und Numerik, Reibungskraft nach Magnaudet [4].

Zusammenfassung und Ausblick

Die Modellierung der Translation einer Einzelblase im moderaten Schallfeld ergibt gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Es scheint insbesondere die Reibungskraft für Gasblasen bei hohen Reynoldszahlen Gültigkeit zu haben. In akustischen Kavitationsfeldern mit hohen Wecheldrücken ist die Translationsgeschwindigkeit um etwa eine Zehnerpotenz größer, die Ruheradien können bis zu einer Größenordnung kleiner sein [5]. Die Radialgeschwindigkeiten sind dann vergleichbar mit denen im vorgestellten Experiment, oder können bis zu einer Größenordnung darüber liegen. Damit sind auch die Reynoldszahlen vergleichbar und rechtfertigen einen Ansatz der Reibungskraft nach Magnaudet. Allerdings können in Vielblasensystemen sowohl Strömungseffekte als auch eine veränderte Viskosität durch Anwesenheit von Mikroblasen die Bewegung einer Blase beeinflussen. In diesem Sinne stellt die hier vorgestellte Untersuchung nur einen Anfang dar und ist Ausgangsbasis für weiterführende Experimente, die sich Schritt für Schritt einem anwendungsrelevanten Kavitationsfeld nähern.

Diese Arbeit wurde unterstützt durch das Graduiertenkolleg *Strömungsinstabilitäten und Turbulenz* und das BMBF Verbundprojekt *Untersuchung von Kavitationsfeldern*.

- [1] T.G.Leighton, *The Acoustic Bubble* (Academic Press, London, 1994)
- [2] U.Parlitz et al., *Phil.Trans.R.Soc.Lond.A* **357**,313-334 (1999)
- [3] L.A. Crum & A.I. Ellert, *J. Acoust. Soc. Am.* **48**,181-189 (1970)
- [4] J. Magnaudet & D. Legendre, *Phys. Fluids* **10**,550-554 (1998)
- [5] S.Luther, Dissertation, Göttingen (2000)