

# Translationsdynamik levitierter Einzelblasen

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

*In akustischen Fallen werden Blasen in das Zentrum des Druckbauches gezogen. Man beobachtet jedoch bei verschiedenen Parametern Translationsbewegungen der Blase um die Gleichgewichtslage herum. Neben langsamen Driftbewegungen können durch Abspaltung von Mikroblasen plötzliche Lageänderungen der Ausgangsblase verursacht werden.*

## Einleitung

In akustischen Stehwellenfeldern wirkt auf Blasen in Flüssigkeiten die sogenannte primäre Bjerkneskraft, eine durch den oszillierenden Druckgradienten verursachte Nettokraft, die in einem weiten Parameterbereich im Schalldruckbauch anziehend ist [1,2,3]. Bei periodischen Schwingungen erwartet man eine stabile Gleichgewichtslage, die wegen der Auftriebskraft im Allgemeinen leicht oberhalb des Schwingungsbauches liegt. Seit langem ist bekannt, dass Ortsinstabilitäten in solchen sogenannten Blasenfallen ('tanzende' Bewegung) durch Oberflächenschwingungen verursacht werden [4]. Auch auf die Fragmentierung in mehrere Blasen und anschließende Rekombination wird in neuerer Literatur hingewiesen [5]. Der genaue Mechanismus ist wegen der kurzen Zeitskalen bisher jedoch wenig untersucht worden (die Prozesse spielen sich in wenigen Schwingungsperioden ab). Die tatsächliche Translationsbewegung in einer Blasenfalle gibt Hinweise auf die Anwendbarkeit der bisherigen Theorie zu Blasen-Flüssigkeits-Systemen. Die Dynamik von fragmentierten Blasen ist von besonderem Interesse, weil dort an einem überschaubaren System die Wechselwirkungen zwischen eng benachbarten oszillierenden Blasen untersucht werden können, insbesondere die sekundäre Bjerkneskraft [2,6,7]. Durch die Verwendung eines Fernmikroskopes in Verbindung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera konnten die Fragmentierungsprozesse räumlich und zeitlich aufgelöst werden. Mit Particle Tracking Velocimetry wurde anschließend das Bildmaterial ausgewertet.

## Experimenteller Aufbau

Als Resonator wurde ein wassergefüllter Plexiglas-Quader (10 cm x 4 cm x 4 cm) verwendet, an den zwei piezokeramische Schallwandler (Durchmesser 3.5 cm, PIC 151) gegenüberliegend angekoppelt sind (s. Abb. 1). Die Küvette wurde bei 32 kHz, einer (2,1,1)-Mode, betrieben. Es befindet sich ein Schalldruckbauch im Zentrum der Küvette. Die Aufnahmen wurden mit einer digitalen Hochgeschwindigkeitskamera (HISIS 2002) gemacht, als Objektiv wurde ein Fernmikroskop (Questar QM 100) verwendet. Aufgenommen wurde mit einer Bildwiederholrate von 2.25 kHz, beleuchtet wurde im Durchlicht mit einem auf die Phase der Anregung synchronisierten LED-Blitz von 2-5  $\mu$ s Blitzdauer. Damit ergibt sich eine zeitliche Auflösung von  $(468.25 \pm 31.25) \mu$ s, was einer Dauer von  $15 \pm 1$  Schwingungsperioden ent-

spricht. Die räumliche Auflösung ergibt sich zu  $1.83 \mu$ m /pixel.

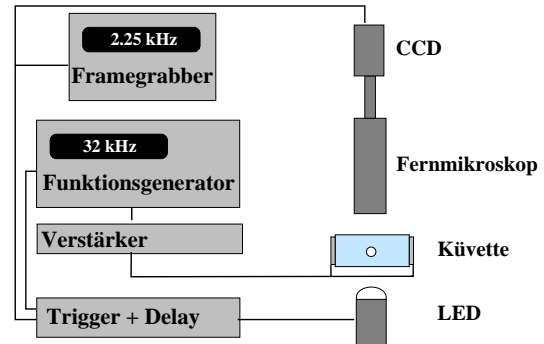


Abb. 1: Aufbau des Experimentes.

## Ergebnisse

Untersucht wurden injizierte Einzelblasen in reinem Wasser bei mittlerem Gasgehalt ( $c/c_0 \approx 50\%$ ). Abb. 2 und 3 geben Trajektorien zweier Blasen mit einem Ruheradius von etwa  $40 \mu$ m wieder.

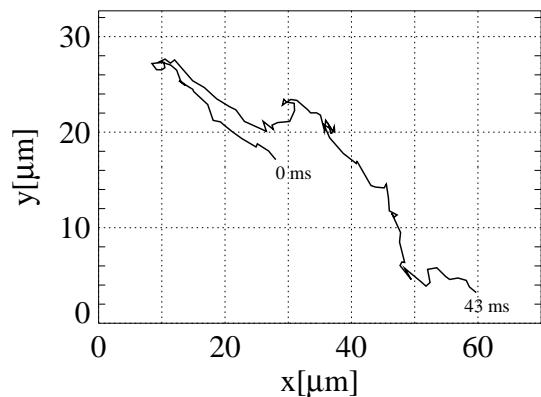


Abb. 2: Trajektorie einer oberflächenstabilen Blase bei  $P_a \approx 70$  kPa.

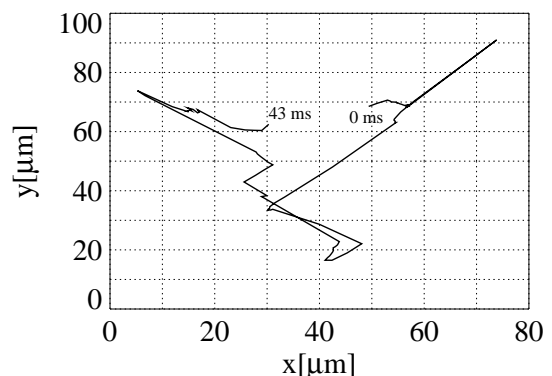


Abb. 3: Trajektorie einer oberflächeninstabilen Blase bei  $P_a \approx 53$  kPa.

Zugrunde liegt jeweils eine Sequenz von 93 Einzelbildern. In Abb. 2 wurde die Translationsbewegung einer oberflächenstabilen Blase verfolgt. Es zeigt sich eine messbare, jedoch in der zeitlichen Auflösung weitgehend stetige Bewegung des Blasen-zentrums. Anders dagegen die Trajektorie einer oberflächeninstabilen Blase, wiedergegeben in Abb. 3. Der Schalldruck ist in diesem Fall niedriger, jedoch ist der Gasgehalt höher, so dass sich ein vergleichbarer Ruheradius ergibt. Die Translationsdynamik zeigt ein deutlich weniger stetiges Verhalten, auch hat die Blase in der gleichen Zeit einen deutlich größeren Aktionsradius, wie ein Vergleich der Skalen zeigt.

Abb. 4 und Abb. 5 geben die Verteilung der beim Tracking ermittelten Geschwindigkeiten wieder.

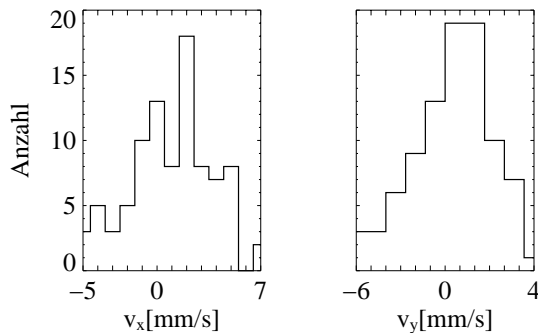


Abb. 4: Die zu Abb. 2 gehörende Geschwindigkeitsverteilung der in die Bildebene projizierten Komponenten.

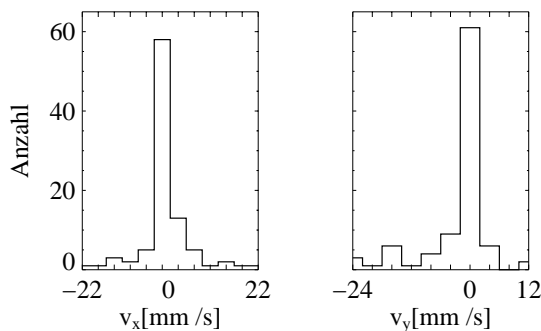


Abb. 5: Die zu Abb. 3 gehörende Geschwindigkeitsverteilung der in die Bildebene projizierten Komponenten.

Die Verteilung der Geschwindigkeiten zeigt in beiden Fällen eine Streuung um den Nullpunkt. Während jedoch die maximale Driftgeschwindigkeit der stabilen Blase in beiden Komponenten unter 10 mm/s liegt, werden im instabilen Fall vereinzelt bis zu vierfach höhere Geschwindigkeiten ermittelt.

Im Folgenden wurde in den Aufnahmen nach Fragmentierungsereignissen gesucht. Abb. 5 gibt die Sequenz einer Abspaltung von zwei Mikroblasen, verursacht durch eine  $n = 4$  Oberflächenmode, wieder. Die Abspaltung erfolgt unsymmetrisch, so dass die untere Mikroblase vermutlich zwischen dem dritten und vierten Bild mit der Hauptblase rekombiniert. Die obere Mikroblase, die sich mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100 mm/s entfernt hat, rekombiniert ebenfalls wieder. Der erste

Eindruck, dass sich die Hauptblase bei der Abspaltung leicht nach unten bewegt hat, und bei der Rekombination wieder aufsteigt, wird durch das Tracking bestätigt. Die Geschwindigkeit beträgt etwa 28 mm/s und liegt damit im Bereich der maximalen Geschwindigkeit der instabilen Blase (s. Abb. 5).

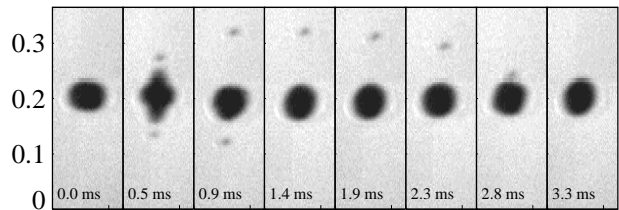


Abb. 6: Unsymmetrische Abspaltung von zwei Mikroblasen (Skalierung in mm).

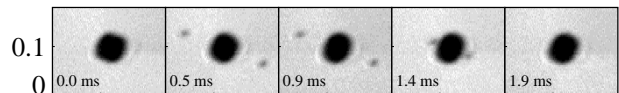


Abb. 7: Symmetrische Abspaltung von zwei Mikroblasen (Skalierung in mm).

Im Vergleich dazu zeigt Abb. 7 eine nahezu symmetrische Abspaltung von zwei Einzelblasen. Dies spiegelt sich in der Symmetrie der Geschwindigkeitsvektoren der Mikroblasen wieder, die nur um etwa 10 % voneinander abweichen. Hier beträgt die ermittelte Geschwindigkeit der Hauptblase nur maximal 1.2 mm/s, liegt also im Vergleich sehr niedrig.

## Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend zeigt sich, dass die gewählten Raum- und Zeitskalen für die Untersuchung von einzelnen Fragmentationsprozessen geeignet sind, wenn auch eine noch höhere zeitliche Auflösung wünschenswert wäre. Insbesondere zeigt sich, dass oberflächeninstabile Blasen während der 'tanzenden' Bewegung über längere Zeiträume (hier: ca. 75 Schwingungsperioden) fragmentieren, um darauf wieder zu rekombinieren. Mit Hilfe der ermittelten experimentellen Daten können nun theoretische Modelle über die Dynamik wechselwirkender Blasen im Schallfeld überprüft werden. Hier ist insbesondere die sekundäre Bjerkneskraft im Nahfeld von Interesse, die mit herkömmlicher Berechnung vermutlich nur ungenau erfasst wird.

- [1] V.F.K.Bjerknes, *Fields of Force* (Columbia University Press, New York, 1906)
- [2] T.G.Leighton, *The Acoustic Bubble* (Academic Press, London, 1994).
- [3] I. Akhatov, R. Mettin, C.D. Ohl, U. Parlitz und W. Lauterborn, Phys. Rev. E 55, 3747-3750 (1997).
- [4] A.I. Ellert & L.A. Crum, J. Acoust. Soc. Am. 47,762-767 (1970).
- [5] D.F. Gaitan & R.G. Holt, Phys. Rev. E 59, 5495 (1999).
- [6] L.A. Crum, J. Acoust. Soc. Am. 57,1363-1370 (1975).
- [7] R. Mettin, I. Akhatov, U. Parlitz, C.D. Ohl und W. Lauterborn, Phys. Rev. E 56, 2924-2931 (1997).