

Emission von Stoßwellen beim Blasenkollaps nahe einer festen Wand

Hendrik Söhnholz, Thomas Kurz, Werner Lauterborn

Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen, 37077 Göttingen, Deutschland, Email: hsoehn@physik3.gwdg.de

Einleitung

Beim Kollaps einer Gasblase in Wasser nahe einer festen Wand bildet sich ein Flüssigkeitsjet aus, der die Blase durchstößt und zu einer asphärischen Blasenform führt. Außerdem kommt es zur Emission von Stoßwellen und es kann sich ein Counterjet bilden, der aus vielen kleinen Bläschen besteht.

Die von der kollabierenden Blase ausgehenden Stoßwellen tragen maßgeblich zur Kavitationserosion bei [2]. In der vorliegenden Arbeit wird die Stoßwellenemission von einer Blase, die vor einer Aluminiumwand kollabiert, für verschiedene Abstände der Blase von der Wand untersucht.

Experimenteller Aufbau

Die Experimente werden mit laserinduzierten Blasen durchgeführt, da diese sich gut reproduzierbar erzeugen lassen. Dazu wird ein ns-Laserpuls mit einem Linsensystem in eine wassergefüllte Küvette fokussiert. Im Wasser kommt es zum Laserdurchbruch und es bildet sich eine Blase (optische Kavitation) [1]. Um den Einfluss einer festen Grenzfläche auf den Blasenkollaps zu untersuchen, wird eine Aluminiumwand in die Nähe des Laserfokus, in dem die Blase erzeugt wird, gebracht. Der Abstand s der Blase von der Wand wird oft durch den maximalen Blasenradius R_{\max} geteilt und damit dimensionlos gemacht:

$$\gamma = \frac{s}{R_{\max}} \quad (1)$$

Mit einer Kamera, die eine kurze Belichtungszeit (500 ns) hat, werden Bilder von den laserinduzierten Blasen und den emittierten Stoßwellen aufgenommen. Die effektive Belichtungszeit von 10 ns wird durch die Pulsdauer

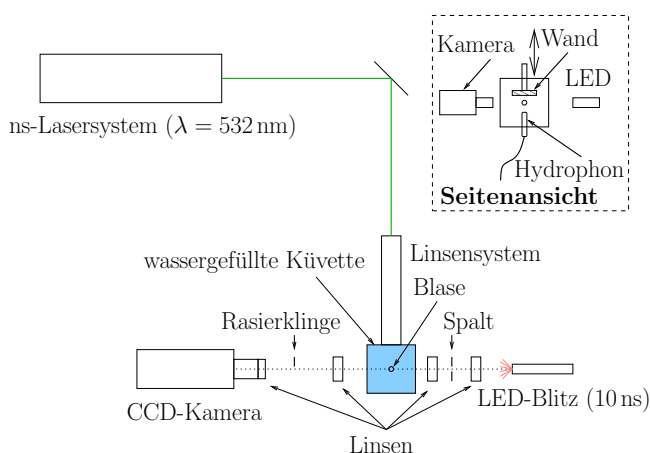


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau mit Schlierenoptik.

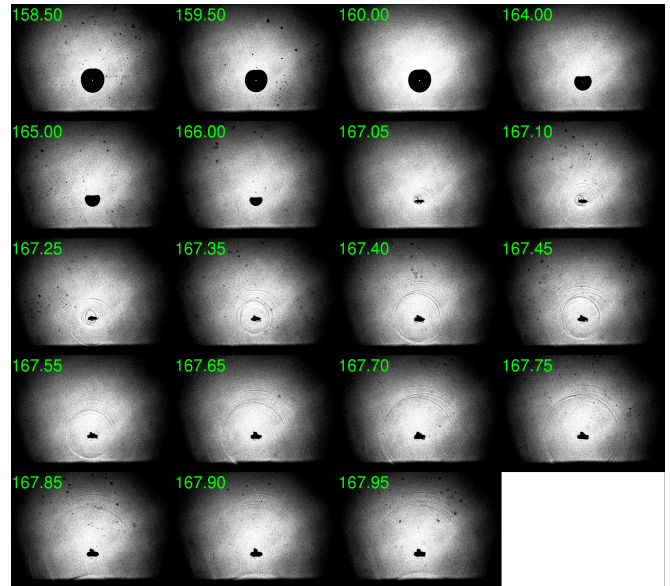


Abbildung 2: Stoßwellenemission bei $\gamma = 1.9$, $R_{\max} = 687 \mu\text{m}$, Bildausschnitt: $6.8 \text{ mm} \times 4.9 \text{ mm}$ (aufgenommen im Schattenverfahren). Die Zahlen in den Bildern geben die Zeit nach der Blasenherzeugung in μs an.

des LED-Blitzes bestimmt. Die beim Laserdurchbruch und im Blasenkollaps emittierten Stoßwellen werden akustisch mit einem Hydrophon (Reson TC4038) gemessen.

Die Stoßwellen rufen im Wasser Dichteänderungen und damit Änderungen des Brechungsindex hervor, die mit Hilfe einer Schlierenoptik sichtbar gemacht werden (Abb. 1). Dichteänderungen lassen sich auch mit dem Schattenverfahren (parallele Beleuchtung, Klinge als optisches Filter entfällt) sichtbar machen. Gegenüber dem Schattenverfahren ist das Schlierenverfahren empfindlicher und die Stoßwellen treten deutlicher hervor.

Die Wiederholrate der Kamera ist für die Erfassung der Stoßwellenausbreitung zu niedrig, so dass von einer Blase jeweils nur ein Bild aufgenommen werden kann. Daher wird die Kamera mit verschiedenen Verzögerungszeiten nach dem Laserdurchbruch ausgelöst. Für jedes Bild wird eine neue Blase mit dem Laser erzeugt. Aus dem gemessenen Hydrophonsignal lässt sich die Zeit vom Laserdurchbruch bis zum ersten Kollaps ermitteln (entspricht der doppelten Rayleigh-Kollapszeit). Nun werden Bilder ausgewählt, bei denen die Blasen gleiche Kollapszeiten haben, und es wird daraus eine Bildsequenz erstellt.

Ergebnisse

In Abb. 2 ist eine Bildserie dargestellt, die im Schattenverfahren aufgenommen wurde. Die Stoßwellen sind hier nur schwach erkennbar. Zu Anfang der Serie ist die Jet-

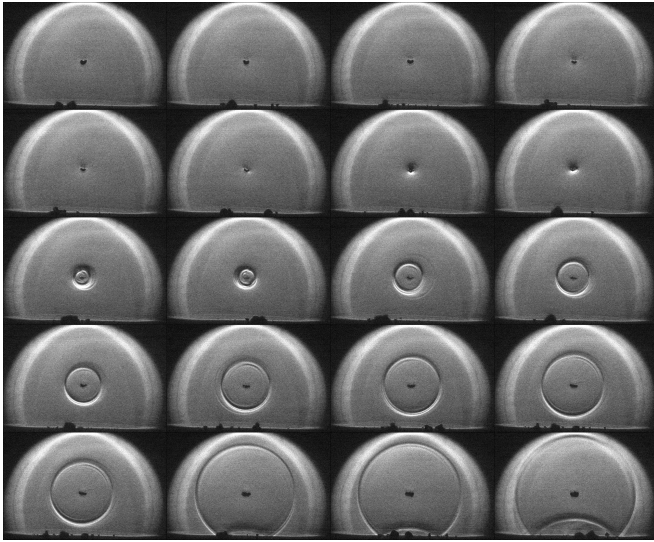


Abbildung 3: Stoßwellenemission bei $\gamma = 2.9$, $R_{\max} = 679 \mu\text{m}$, Bildausschnitt: $7.2 \text{ mm} \times 4.7 \text{ mm}$ (aufgenommen im Schlierenverfahren). Bildabstand: 100 ns.

bildung gut zu sehen (Bild 4, 5 und 6). In jedem Bild ist die Zeit nach dem Laserdurchbruch in μs angegeben.

In Abb. 3 ist die Stoßwellenausbreitung im Blasenkollass für $\gamma = 2.9$ dargestellt. Die Aluminiumwand befindet sich unten im Bild. Die Aufnahmen wurden mit Hilfe der Schlierenoptik erstellt; der Bildabstand beträgt 100 ns. Es ist zu erkennen, dass mehrere Stoßwellen ausgesandt werden, die zeitlich dicht aufeinander folgen und nahezu vom gleichen Ort ausgehen. In den letzten drei Bildern der Serie ist die Reflexion der Stoßwelle an der Aluminiumwand zu sehen.

Bei $\gamma = 1.0$ (Abb. 4) werden ebenfalls mehrere Stoßwellen emittiert, die aber nun von verschiedenen Orten ausgehen. Das ist besonders deutlich im dritten und vierten Bild der Serie zu erkennen. Außerdem kann man wieder die Reflexion der Stoßwelle an der Wand beobachten. Zusätzlich ist hier eine Kopfwelle erkennbar, die tangential zur reflektierten Welle verläuft. Sie entsteht dadurch, dass die Stoßwelle sich auch innerhalb der Aluminiumwand ausbreitet. Von der Wandoberfläche gehen wiederum Elementarwellen aus, die eine ebene Stoßfront bilden – die Kopfwelle.

Der Machsche Winkel θ , in dem die Kopfwelle zur Aluminiumwand verläuft, beträgt hier etwa 31° . Er hängt vom Verhältnis der Schallgeschwindigkeiten in Wasser und in Aluminium ab:

$$\sin \theta = \frac{c_{\text{Wasser}}}{c_{\text{Alu}}} \quad (2)$$

Mit $c_{\text{Wasser}} = 1483 \text{ m/s}$ und $c_{\text{Alu}} = 3040 \text{ m/s}$ (Transversalwelle) ergibt sich $\theta = 29.2^\circ$ (Werte entnommen aus [4]).

Diskussion

Wie auch schon in früheren Arbeiten gezeigt wurde, ist der asphärische Blasenkollass sehr stark vom Wandabstand γ abhängig [2, 3].

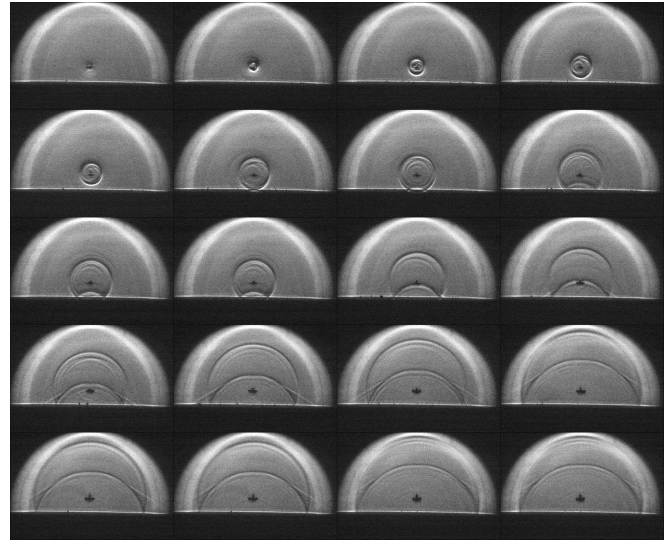


Abbildung 4: Stoßwellenemission bei $\gamma = 1.0$, $R_{\max} = 679 \mu\text{m}$, Bildausschnitt: $7.2 \text{ mm} \times 4.7 \text{ mm}$ (aufgenommen im Schlierenverfahren). Bildabstand: 100 ns.

Die Stoßwellenausbreitung beim Kollaps einer laserinduzierten Blase vor einer Wand wurde u. a. auch von Lindau [3] untersucht. Der dort angegebene dimensionslose Abstand $\gamma = 2.6$ liegt zwar nicht weit entfernt vom hier verwendeten Wert von 2.9. Allerdings wurden in [3] Blasen mit $R_{\max} = 1.5 \text{ mm}$ betrachtet. Die Ausbreitung der Stoßwellen weicht daher von der hier dargestellten Sequenz (Abb. 3) ab. Um die Abhängigkeit vom Wandabstand s sowie vom maximalen Blasenradius R_{\max} genauer zu untersuchen, sind weitere Experimente erforderlich.

Der ermittelte Machsche Winkel entspricht den Erwartungen; zumal die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Transversalwellen in der verwendeten Aluminiumwand nicht exakt bekannt ist. Außerdem ist noch zu berücksichtigen, dass die von der Blase emittierten Stoßwellen mit Überschallgeschwindigkeit laufen können.

Danksagungen

Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung im Rahmen des Projekts KU 1959/2-1.

Literatur

- [1] Lauterborn, W. und Bolle, H.: Experimental investigations of cavitation-bubble collapse in the neighbourhood of a solid boundary. *J. Fluid Mech.* 72 (1975), 391-399
- [2] Philipp, A. und Lauterborn, W.: Cavitation erosion by single laser-produced bubbles. *J. Fluid Mech.* 361 (1998), 75-116
- [3] Lindau, O. und Lauterborn, W.: Cinematographic observation of the collapse and rebound of a laser-produced cavitation bubble near a wall. *J. Fluid Mech.* 479 (2003), 327-348
- [4] Kuttruff, H.: *Akustik*. Hirzel, Stuttgart, 2004