

Torusförmiger Kavitationsblasenkollaps

OLGERT LINDAU¹ und WERNER LAUTERBORN
Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen
Bürgerstraße 42-44, 37073 Göttingen

Beim Zusammenfallen einer Kavitationsblase in der Nähe einer festen Grenzfläche wird die Form der Blase instabil. Es bildet sich auf der Seite, die der Grenzfläche gegenüber liegt, eine Eindellung, die sich zu einem Flüssigkeitsstrahl (Jet) entwickelt. Der Jet schießt durch die Blase hindurch. Mit dem Aufprall auf die der Grenzfläche zugewandten Blasenwand wird die Blase torusförmig. Das weitere Zusammenfallen und Wiederaufschwingen der torusförmigen Blase wird experimentell untersucht. Die Ergebnisse werden vorgestellt und diskutiert.

Einleitung

Die Dynamik einer Kavitationsblase in der Nähe einer festen Grenzfläche hängt im wesentlichen und ganz entscheidend von ihrem Abstand zur Grenzfläche ab. Dieser mit dem Maximalradius der Blase normierte Abstand des Blasen-zentrums von der Grenzfläche wird im folgenden γ genannt.

Der erste Kollaps und das anschließende Wiederaufschwingen einer laserinduzierten Kavitationsblase in der Nähe einer festen Grenzfläche ist im Bereich $1,2 \geq \gamma \geq 0,1$ experimentell untersucht worden. Die Untersuchung [1] ist umfangreich und kann hier nur zum Teil wiedergegeben werden. Eine Auflistung der Hauptergebnisse ist jedoch in der Zusammenfassung gegeben (weiterführende Literatur [2–4]).

Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Blasendynamik und die Volumenkompression lasererzeugter Kavitationsblasen besprochen.

Blasendynamik

Im folgenden wird der Blasen-kollaps exemplarisch für $\gamma = 0,9$ vorgestellt.

Eine Sequenz der Blasendynamik in der Endphase des Kollapses ist in Abbildung 1 gezeigt. Der dimensionslose Abstandparameter ist 0,9. Die Sequenz ist hochgeschwindigkeitskinematografisch mit 500.000 Bildern pro Sekunde aufgenommen, und die Blase ist von unten, durch die Grenzfläche hindurch, gezeigt. Sie ist $349 \mu\text{s}$ vor dem ersten Bild der Sequenz, durch einen starken, im Wasser fokussierten Laserpuls, erzeugt worden. Die Blase ist bis zu einem Maximalradius von 1,5 mm aufgeschwungen und hat danach begonnen in sich zusammenzufallen. Dabei ist auf der Seite, die der Grenzfläche gegenüberliegt, ein Jet entstanden, der sich in die Blase hineinbewegt.

Im ersten Bild befindet sich die Blase sehr dicht an der Grenzfläche. Der Jet ist in die Blase vorgedrungen und trifft in diesem oder dem zweiten Bild auf die Grenzfläche auf und hinterlässt eine torusförmige Blase, die im folgenden zu einem Ring kollabiert. Die Flüssigkeit der Jetspitze fließt dabei radial zwischen Blase und Grenzfläche nach außen. Sie trifft auf eine nach innen gerichtete Strömung, die aus dem Zusammenfallen der Blase resultiert, und produziert einen ringartigen Wulst [5]. Der Wulst erscheint in der Abbildung dunkel und bewegt sich auf den äußeren Blasenrand zu (siehe Reihe 2). Er erzeugt eine

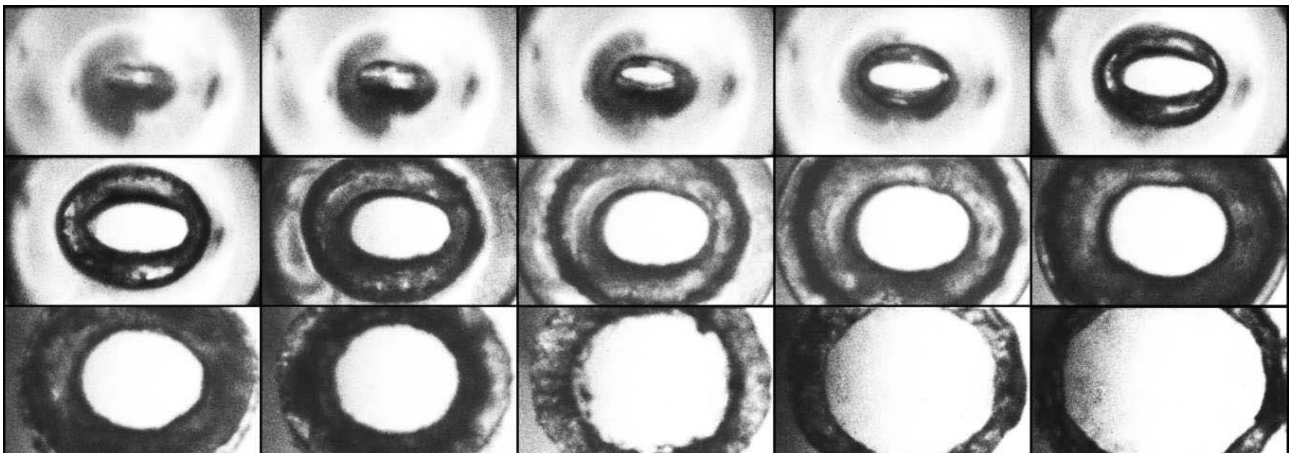


Abb.1: Hochgeschwindigkeitskinematografische Aufnahme des Blasen-kollapses in der Nähe einer festen Grenzfläche. Die Blase ist durch die Grenzfläche aus Glas hindurch fotografiert. Bildabstand $2 \mu\text{s}$, Belichtungszeit 10 ns , $\gamma = 0,9$, $R_{\text{max}} = 1,5 \text{ mm}$, Bildgröße $1,64 \text{ mm} \times 1,03 \text{ mm}$.

¹Present address: University of California, Department of Mechanical Engineering, Berkeley, California 94720-1740, USA

raue Blasenoberfläche. Das Blasenminimum ist zwischen dem 14. und 15. Bild erreicht. Danach schwingt die Blase wieder auf.

Ein im Hinblick auf die schädigende Wirkung der Blasen auf die Grenzfläche wichtiger Aspekt ist die Volumenkompression im Minimum. Sie wird im nächsten Abschnitt bestimmt.

Kompression

In Abbildung 2 ist die Kompression der Blase im Minimum aufgetragen. Sie ist durch den Quotienten $V_{max}/V_{min}^{(\gamma)} = 2R_{max}^3/(3\pi Rr^2)$ der Blasen-
volumen V_{max} im Maximum und $V_{min}^{(\gamma)}$ im Minimum definiert. Hier ist R_{max} der Maximalradius der Blase. R ist der große, und r der kleine Torusradius der Blase im Minimum. Die Radiuswerte sind aus hochgeschwindigkeitskinematografischen Aufnahmen mit $1\ \mu s$ Bildabstand und einer Ortsauflösung von wenigen Mikrometern bestimmt. Sie unterliegen leichten Schwankungen, aus denen sich eine zum Teil nicht unerhebliche Unsicherheit in der Bestimmung der Kompression ergibt. Die Fehler sind für Blasen mit großer Kompression erheblich stärker als für schwach komprimierte Blasen, da der relative Fehler für den kleinen Torusradius bei kleinen Radien groß wird.

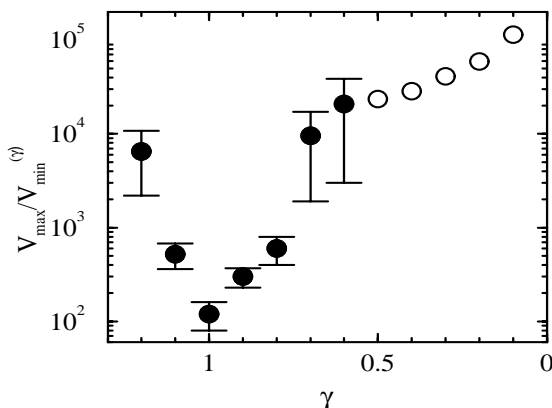


Abb.2: Kompression $V_{max}/V_{min}^{(\gamma)}$ im Blasenminimum.

Die Kompression der Blase durchläuft in Abhängigkeit von γ mehrere Größenordnungen. Bei $\gamma = 1,0$ hat sie das absolute Minimum erreicht und beträgt etwa 100. Für steigende γ -Werte nimmt die Kompression schnell zu. Für $\gamma = 1,1$ hat sie einen fünffach höheren Wert und liegt für $\gamma = 1,2$ schon bei etwa 6000. Eine Blase mit $\gamma = 2,6$ hat eine noch höhere Kompression (etwa 20000, siehe [4]). Für größere γ -Werte nimmt die Kompression weiter zu. Bei einer ungestörten, kugelförmigen Blase ist die Kompression dann 2000 mal größer als für $\gamma = 1,0$ und liegt bei $2 \cdot 10^5$ (siehe [4]). Für γ -Werte unter 1,0 nimmt die Kompression ebenfalls wieder zu und liegt bei $\gamma = 0,6$ über 10000. Dieser Wert ist jedoch mit einer großen Unsicherheit verbunden. Für $\gamma \leq 0,5$

tritt bei der Bestimmung der Kompression eine Schwierigkeit auf. Die Blasenstruktur ist im Minimum netzartig. Die für diese γ -Werte präsentierten Kompressionen (offene Kreise) beruhen auf einer vereinfachenden Annahme (siehe [1]) und sind deshalb ohne Fehlerbalken aufgetragen. Die Fehler sind aber vermutlich größer als für die anderen Werte.

Zusammenfassung

Die Auswertung einer großen Anzahl hochgeschwindigkeitskinematografischer Aufnahmen führt zu folgenden Hauptergebnissen:

(i) Für $\gamma > 0,5$ befindet sich zwischen Blase und Grenzfläche ein dünner Flüssigkeitsfilm. Die nach dem Jetaufprall zwischen Blase und Grenzfläche nach außen gerichtete Strömung trifft auf einen Gegenströmung und erzeugt einen wulstartigen Ring, der zum äußeren Blasenrand hin wandert.

(ii) Für γ -Werte unter 0,5 befindet sich die Blase im Kollaps zunächst in direktem Kontakt zur Grenzfläche und wird dann von der nach außen gerichteten Strömung des Jets getrennt.

(iii) Bei γ -Werten unter 0,8 entstehen im Kollaps am äußeren Blasenrand konzentrische Ringe.

(iv) Im Volumenminimum bildet eine Blase mit $\gamma < 0,5$ eine netzartige Struktur aus.

(v) Die maximale Volumenkompression hat bei $\gamma = 1,0$ ein absolutes Minimum und steigt für $\gamma \rightarrow 0$ um drei Größenordnungen.

Wir danken den Mitgliedern der Kavitationsarbeitsgruppe am Dritten Physikalischen Institut für anregende Diskussionen, sowie der DFG und dem BMBF für finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] O. LINDAU & W. LAUTERBORN. Dynamics of a laser produced cavitation bubble near a wall. Part 2. Toroidal bubble collapse. *Zur Veröffentlichung eingereicht.*
- [2] W. LAUTERBORN, W. HENTSCHEL & R. TIMM. Ist der Kollapszustand einer Kavitationsblase ein Wirbelring? *DAGA '81.*
- [3] O. LINDAU & W. LAUTERBORN. Untersuchung zum Counterjet von Kavitationsblasen. *DAGA 2001.*
- [4] O. LINDAU. Untersuchungen zur lasererzeugten Kavitation. *Dissertation*, Georg-August-Universität, Göttingen, 2001.
- [5] R. P. TONG, W. P. SCHIFFERS, S. J. SHAW, J. R. BLAKE & D. C. EMMONY. The role of 'splashing' in the collapse of a laser-generated cavity near a rigid boundary. *J. Fluid Mech.* **380**, 339–361, 1999.