

Stoßwellenentstehung und Einzelblasen-Sonolumineszenz

JOACHIM HOLZFUSS, MATTHIAS RÜGGERBERG und ANDREAS BILLO
Institut für Angewandte Physik, TH Darmstadt,
Schloßgartenstr. 7, 64289 Darmstadt

Eine sonolumineszierende Blase sendet zum Kollapszeitpunkt eine Stoßwelle aus. Dieses experimentelle Ergebnis wird durch eine direkte Visualisierung der kollabierenden Blase und der abgestrahlten Stoßwelle erhalten. Die Dynamik der Stoßwellen wird vermessen und die Anwendungen zur Untersuchung stabiler und instabiler Sonolumineszenz diskutiert.

Einleitung

In eine stehende Ultraschallwelle kann eine Luftblase eingebracht werden, die im Druckbauch der Welle gegen die Auftriebskraft gehalten wird. Die Blase mit einem Radius von ca. $5\mu\text{m}$ wird zu stark nichtlinearen Schwingungen angeregt. Bei Schalldrücken von 1.1 - 1.5 bar werden Volumenunterschiede beim Übergang von der Kompressions- zur Elongationsphase von mehr als 10^6 erzielt. Zum Kollapszeitpunkt ist die Kompression so hoch, daß ein Lichtblitz ausgesendet wird [1]. Die eigentliche Ursache dieses Lichtblitzes, der eine Länge von einigen 10 ps hat und dessen optisches Spektrum durch ein Schwarzkörperspektrum von einigen 10.000°K angenähert wird [2], ist Gegenstand intensiver Forschung. Daß zusätzlich zum Lichtblitz eine Stoßwelle ausgesendet wird, wird schon länger vermutet. Die direkte Visualisierung der in die Flüssigkeit abgehenden Stoßwelle wurde nun durch Beleuchtung mit einem Kurzpulslaser erreicht. Der Durchmesser und die Lage der kugelsymmetrischen Stoßwelle ergibt Informationen über die Dynamik der Blase in der Zeit und im Raum.

Experiment

In einer wassergefüllten, zylinderförmigen Küvette wird ein Stehwellenfeld aufgebaut, das von zwei piezokeramischen Hohlzylindern, die mit 20 kHz schwingen, erzeugt wird. Ein Kupferdampflaser, der mit ca. 10 kHz Pulse von 15 ns Dauer erzeugen kann, wird zur Beleuchtung der Blase eingesetzt (Abb. 1). Die Pulsphase wird relativ zum Blasenkollaps kontrolliert gesteuert. Durch phasengelockte Aufnahme ist es möglich, den stabil wiederkehrenden Kollaps "einzufrieren". Außerdem kann durch einen periodischen Phasenversatz bei der Aufnahme die gesamte Dynamik visualisiert werden. Die Abbildung der Blase geschieht über einen vergrößerten $4f$ -Aufbau mit eingebauter Schlierenblende zur Sichtbarmachung der Stoßwellen als Phasenobjekt. Die Bildinformation selbst wird mit einer Videokamera aufgenommen und kann später zur

weiteren Auswertung digitalisiert werden. Die im Experiment eingestellte Auflösung war $7.2\mu\text{m}$ pro Pixel. Die eingestellte Schalldruckamplitude wird mit einem Hydrofon kontrolliert, der Gasgehalt der vorher präparierten Flüssigkeit wird durch das Gleichgewicht mit einem variablen Außendruck eingestellt.

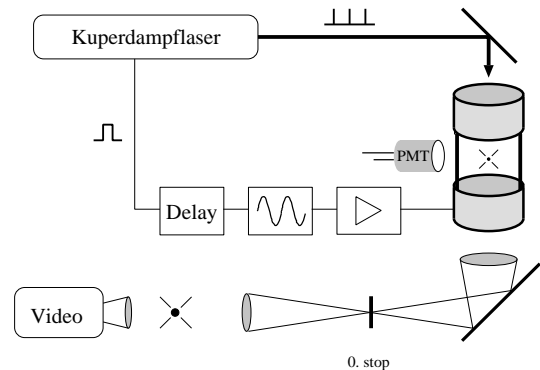


Abb.1: Versuchsaufbau zur Visualisierung von Stoßwellen einer sonolumineszierenden Blase: In einem Stehwellenfeld wird eine Einzelblase gehalten und durch den Schalldruck zum Leuchten gebracht. Die Blase wird mit einem Kupferdampflaser beleuchtet, dessen Wiederholrate ca. die halbe Anregungsfrequenz ist. Das Bild der Blase wird durch eine Schlierenoptik und eine Videokamera aufgenommen.

Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt zwei Bilder von Stoßwellen, die zu unterschiedlicher Phase relativ zum Kollaps aufgenommen sind. Bei fester Anregungsamplitude (ca. 1.3 bar), -frequenz und Abtastphase ist das hier gezeigte Bild über sehr lange Zeiten stabil (stabile Sonolumineszenz). Durch Einstellung unterschiedlicher konstanter Abtastphasen kann man die Stoßwellengeschwindigkeit zu 1500 m/s vermessen. Im Bild ist die Breite der Stoßwellen durch die Dauer des Laserpulses vorgegeben, die tatsächliche Breite dürfte unterhalb der hier bestimmbaren liegen.

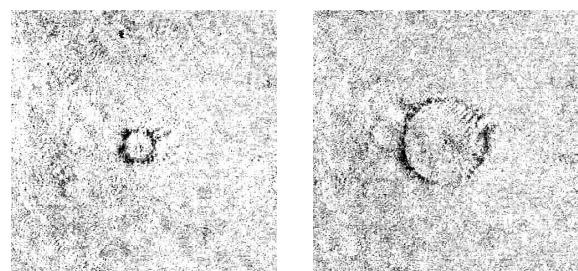


Abb.2: Videobilder von im Blasenkollaps ausgesendeten Stoßwellen bei unterschiedlicher Belichtungsphasenlage (Durchmesser: 0.4 und 1.1 mm).

Interessant ist die Beobachtung mit sich langsam ändernder Phasenlage: Kurz (ca. $2 \mu\text{s}$) vor dem Aussenden der Stoßwellen, der zum Hauptkollaps erfolgt, ist eine in das Bild ein- und wieder auslaufende Stoßwelle sichtbar, die von einer Reflektion an der Zylinderwand herrührt. Häufig wird die Blase durch die reflektierte Stoßwelle beeinflusst, was sich in Form eines kurzzeitigen Ortswechsels äußert.

Eine Änderung der anregenden Amplitude äußert sich bei konstanter Belichtungs-Phasenlage in einer Änderung des Radius der Stoßwelle: Wird die Amplitude erhöht, vergrößert sich die Differenz zwischen den Zeiten an denen die Blase ihren Maximal- und Minimalradius annimmt. Die Zeit zwischen dem Kollaps und dem nachgeschalteten Belichtungspuls verkleinert sich und der resultierende Stoßwellenradius wird verringert.

Wird die Amplitude des Schallfeldes über 1.5 bar erhöht, verschwindet die Blase durch Instabilitäten (Rayleigh-Taylor). Kurz zuvor jedoch beginnt ein Bereich instabiler Sonolumineszenz. Er äußert sich durch kurzes Zucken der Blase und durch das kurzfristige Verschwinden der Lichtemission. Die Erklärung hierfür ist, daß die Blase sich nicht mehr in einem diffusiven Gleichgewicht mit dem Gasgehalt der Umgebungsflüssigkeit befindet: Die Blase wächst an, wird instabil, stößt einen Teil ihres Volumens ab und wird dadurch kleiner. Dieser Vorgang wiederholt sich alle 10 bis 20 Sekunden, je nach Amplitude auch häufiger.

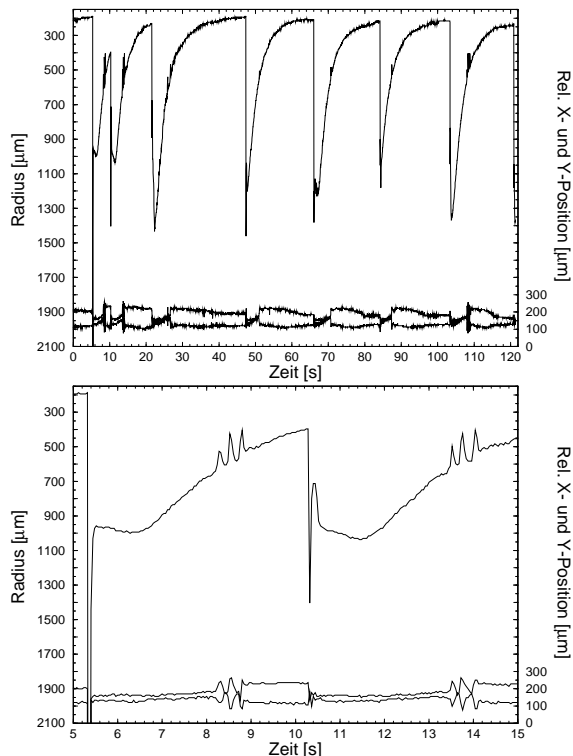


Abb.3: Stoßwellenradius (jeweils obere Kurve) und x-y Position bei instabiler Sonolumineszenz (untere Kurve) a) Gesamtmessung, b) Ausschnitt.

Zur Sichtbarmachung der Dynamik wird im Computer dem Videobild ein Kreis überlagert und so automatisch die Lage der Stoßwelle bestimmt. Hiermit ist es möglich, die Lage der Blase in einer

Projektion des Raumes und den zum Blasenradius invers proportionalen Stoßwellenradius zu bestimmen.

Die Abbildungen 3 zeigen die Entwicklung des Radius der Stoßwelle (jeweils oben) und den relativen x und y Koordinaten der Lage der Blase. Deutlich ist wiederholt das diffusive Anwachsen der Blase über der Zeit zu erkennen. Nach einiger Zeit trennt sich die Blase von einem Teil ihres Gasvolumens. Dies ist mit einer rapiden Zunahme des Stoßwellenradius verbunden (der Kollaps kommt früher). Verbunden ist der Gasvolumenausstoß mit einer Änderung der Blasenposition. Diese sehr schnelle Änderung kann jedoch bei einer Aufnahme mit nur 25 Hz Videofrequenz nicht vollständig aufgelöst werden. Aus doppelbelichteten Aufnahmen läßt sich jedoch eine Blasengeschwindigkeit von mindestens 0.42 m/s ablesen. In den Abbildungen 3 fällt im weiteren auf, daß die Blase während des Anwachsens bei einer bestimmten Größe in einem großen diskreten Schritt ihre Position im Raum ändert, während die sonstigen Positionsveränderungen eher kontinuierlich verlaufen und klein sind. Diese Positionsveränderung ist mit einem Nachschwingen verbunden, wie man in Abbildung 3b sieht (z.B. bei 8.2s). Die Positionsveränderungen stehen wahrscheinlich in direktem Zusammenhang mit der verringerten Auftriebskraft bei kleinerem Blasenradius. Jedoch ist der diskrete Schritt so nicht zu erklären. Als eine Möglichkeit der Erklärung bietet sich an, daß die Blase vor und nach dem Wechsel in einer anderen Resonanz schwingt. Wäre dies der Fall, würden unterschiedliche (primäre) Bjerkneskräfte wirken, die die Blase im Stehwellenbauch halten. Durch eine schwächere Bjerkneskraft würde die Blase ein Stück nach oben verschoben.

Weiterführende Untersuchungen sollen unter anderem klären, warum Änderungen im Radius nicht immer mit Positionsveränderungen korrelieren (s. Abb. 3b, Ausschnitt 10.5 - 12s). Außerdem soll die genaue Rolle der Stoßwellendynamik bei der chaotischen Sonolumineszenz [3,4] geklärt werden. Die Messung von Stoßwellen außerhalb der Blase untermauert die These, daß innerhalb der stark komprimierten Blase laufende Stoßwellen existieren, die für die Sonolumineszenz verantwortlich sind.

Literatur

- [1] D. F. Gaitan, L. A. Crum, C. C. Church, and R. A. Roy, *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 3166 (1992).
- [2] B. P. Barber, S. J. Putterman, *Nature* **352**, 318 (1991).
- [3] J. Holzfuss, R.G. Holt, D.F. Gaitan & A.A. Atchley, "Sonolumineszenz oszillierender Blasen: Untersuchungen zu einem neuen Phänomen", *Fortschritte der Akustik - DAGA '93*, Bad Honnef: DPG GmbH, 329-332, (1993).
- [4] R.G. Holt, D.F. Gaitan, A.A. Atchley & J. Holzfuss, "Chaotic sonoluminescence", *Phys. Rev. Lett.*, **72**(9), 1376-1379 (1994).

