

# Entwicklung laserinduzierter Kavitationsblasen im stehenden Ultraschallfeld

Laurens-Georg Wißmann, Thomas Kurz, Werner Lauterborn

Drittes Physikalisches Institut, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Deutschland

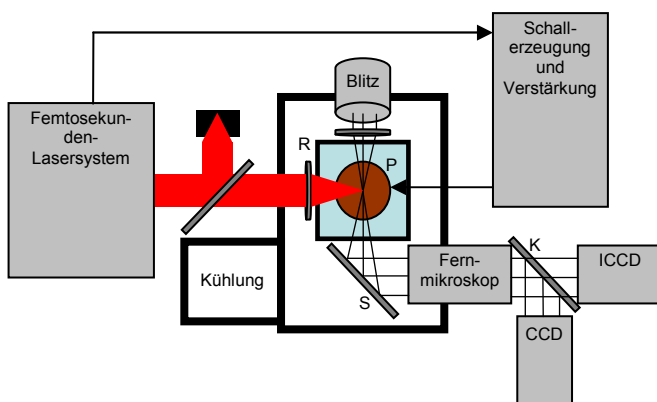
Email: [laurens@physik3.gwdg.de](mailto:laurens@physik3.gwdg.de)

## Einleitung

Mithilfe laserinduzierter Kavitation lassen sich Blasen an nahezu beliebigen Stellen und zu definierten Zeiten (z. B. zu einer festen Phase der Anregung) in einem Ultraschallfeld erzeugen. Die anschließende Blasendynamik und die damit verbundenen Effekte, z. B. die Kavitationslumineszenz, können mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung verfolgt werden, solange die Blase nicht zerfällt oder aus dem Bildfeld herauswandert. Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses von Schalldruck, Umgebungsdruck und Wassertemperatur auf die Radialdynamik und die Lumineszenz im ersten Kollaps einer laserinduzierten Blase.

## Aufbau des Experiments

Die wesentlichen Teile des Versuchsaufbaus [s. Abb. 1] sind das Lasersystem, der akustische Resonator, die Beobachtungsoptik und die Steuerungselektronik. Das Femtosekunden-Lasersystem erzeugt Pulse mit einer Länge von 130 fs und einer einstellbaren Energie im Bereich einiger Mikrojoule. Die maximale Pulswiederholungsrate liegt bei 1000 Hz („kontinuierlicher Betrieb“), es ist allerdings auch Einzelpulsanforderung möglich. Die aus dem abgekühlten Laserplasma entstehenden Blasen haben Gleichgewichtsradien um die 2  $\mu\text{m}$ . Der akustische Resonator R ist eine kubische, wassergefüllte Küvette mit dem Innenmaß 2,5 cm; sie wird von einem am Boden angeklebten Piezoschwinger P ange-regt. Bei einer Anregungsfrequenz von ca. 43 kHz bildet sich eine (1,1,1)-Mode heraus. Es werden Schalldrücke bis 5 bar erreicht. Das Wasser wird mehrere Stunden entgast und gefiltert (Porengröße 200 nm). Der Resonator mit Thermometer, Hydrophon und Wasserbefüllung befindet sich in einem Kühlkasten (Betriebstemperatur 0° C bis 40° C).

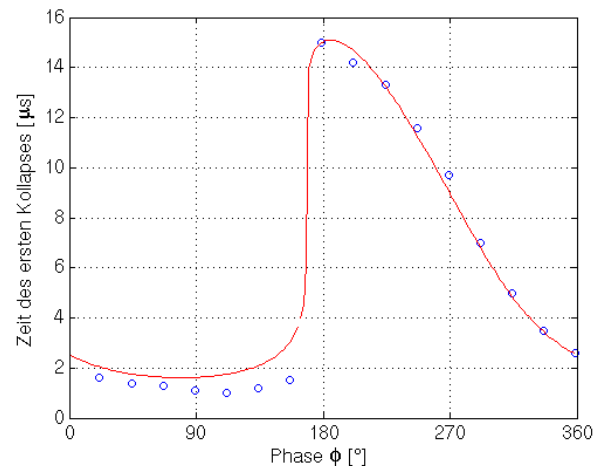


**Abbildung 1:** Schema des Versuchsaufbaus. Im Resonator R werden in ein mit dem Piezoelement P erzeugtes stehendes Ultraschallfeld Blasen eingeschossen. Die Beobachtung erfolgt über Spiegel S und Kippspiegel K. Die Blasendynamik und Lumineszenz werden bei verschiedenen Drücken und Temperaturen vermessen.

Die Beobachtungsoptik besteht aus einem Blitz, einem Spiegel S und einem Fernmikroskop; mit einem Kippspiegel K kann man zwischen der Beobachtung der radialen Dynamik mit einer schnellen CCD-Kamera (Belichtungszeit < 200 ns, max. Auflösung  $\sim 1.5 \mu\text{m}$ ) und der Aufnahme der Lumineszenz mit einer intensivierten CCD-Kamera umschalten. Die Steuerungselektronik dient der zeitlich genauen Auslösung der verschiedenen Komponenten des Experiments, insbesondere lässt sich die Phase des Schallfeldes bei Einschuss elektronisch einstellen.

## Bestimmung des Schalldrucks

Die Bestimmung des Schalldrucks am Ort der Blase zur Kalibrierung des Hydrophons erfolgt durch eine Anpassung der Parameter des Gilmore-Modells an die gemessene Radialdynamik [1,2]. Es wird zunächst aus der Dynamik der nicht getriebenen Blase der Gleichgewichtsradius und die anfängliche Geschwindigkeit der Blasenwand bestimmt. Anschließend wird die Zeit des ersten Riesenkollapses im angeregten Fall für drei verschiedene Anregungsdrücke  $p_a$  bei je 16 verschiedenen Phasen gemessen. Diese Daten werden mit dem Gilmore-Modell gefittet [s. Abb. 2], mit den so errechneten Schalldrücken wird das Hydrophon kalibriert.

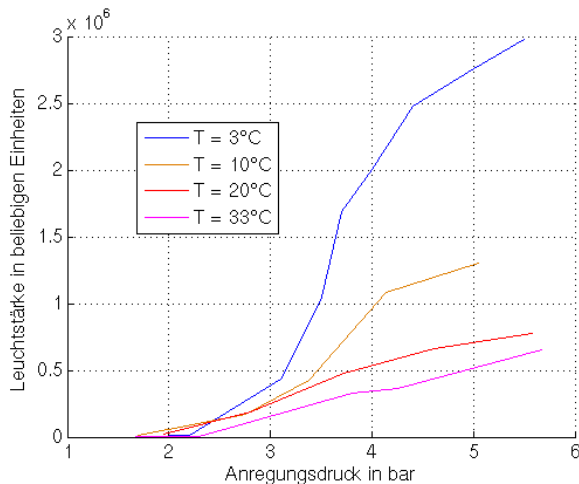


**Abbildung 2:** Die Zeit des ersten Riesenkollapses der schallgetriebenen Blase wird zu verschiedenen Phasen gemessen. Der Fit mit dem Gilmore-Modell liefert  $p_a$ .

## Ergebnisse

Abb. 3 zeigt die Lumineszenz im ersten Kollaps von in die Überdruckphase geschossenen Blasen für verschiedene Temperaturen als Funktion des Anregungsdrucks. Bei allen Temperaturen lässt sich ein Anstieg der Lumineszenz mit steigendem Schalldruck feststellen. Dies kann sowohl am größeren Maximalradius liegen, sodass im Kollaps eine höhere Temperatur erreicht wird, oder an der größeren Men-

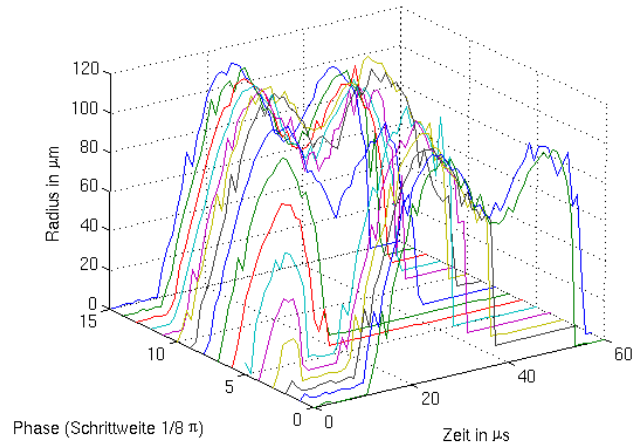
ge an Teilchen in der Blase, die zu einer größeren Leuchtstärke führen. Eine erhebliche Steigerung der Leuchtstärke geht mit dem Senken der Wassertemperatur einher. Ein wesentlicher Grund hierfür ist vermutlich der sinkende Dampfdruck, der exponentiell von der Temperatur abhängt. Eine analoge Abhängigkeit wurde auch für die stabile Einzelblasensonolumineszenz (SBSL) beobachtet [3]. Molekulardynamiksimulationen können Aufschluss über die Abhängigkeit des Wasserdampfgehaltes von der Wassertemperatur geben: Bei Erhöhung der Wassertemperatur von 277 K auf 310 K steigt die in der Blase enthaltene Wasserdampfmenge gegen Ende des Kollapses auf das mehr als 17-fach, entsprechend ändert sich die Lichtemission erheblich [4].



**Abbildung 3:** Messwerte für die Leuchtstärke im ersten Kollaps bei verschiedenen Drücken und Temperaturen. Die Leuchtstärke steigt erheblich mit sinkender Wassertemperatur.

Neben der Beeinflussung der Temperatur lässt der Versuchsaufbau auch ein Absenken des Umgebungsdrucks in der Küvette zu. Untersuchungsgegenstand war hierbei wieder die Kavitationslumineszenz. Bei einem Druck von 55 mbar und einer Temperatur von 3° C war kein Leuchten zu detektieren. Dafür kommt es zu einem anderen Effekt: Die radiale Dynamik verändert sich von dem bei der SBSL gewohnten Bild (langes Aufschwingen, schneller Kollaps, leichtes Nachschwingen) hin zu einer Transienten, die das Gegenstück zu einer Subharmonischen Schwingung darstellt. In Abb. 4 sind die Messwerte für die Radien der bei verschiedenen Phasen erzeugten Blasen über der Zeit aufgetragen. Das Schallfeld hat eine Periode von 22,8  $\mu\text{s}$ , die Blase bei Phase 5 wird genau zu Beginn der Unterdruckphase erzeugt. Der Schalldruck war mit der oben genannten Methode nicht zu ermitteln, es wurde allerdings mit maximal möglicher Piezospannung gearbeitet. Zu erkennen ist, wie die Blase zu Beginn der Unterdruckphase erzeugt wird, sodass sie sofort weit aufschwingt. In der anschließenden Überdruckphase verringert sich der Radius, es kommt aber nicht zum Kollaps. Die nächste Unterdruckphase bewirkt wieder eine Vergrößerung des Blasenradius, und erst in der zweiten Überdruckphase kommt es zum Blasen-kollaps. In diesem Kollaps wurde kein Leuchten festgestellt, und die Blase wird zerstört – anschließend schwingt ein Blasen-

cluster auf. Als Gründe für das Ausbleiben der Lumineszenz kann man zunächst den weniger schnell verlaufenden Kollaps anführen, die abfallende Flanke ist weniger steil (siehe z. B. Phase 0, Abb. 4). Außerdem begünstigt die lange Phase mit großen Radien die Anregung von Oberflächenschwingungen der Blasenwand, sodass die Sphärizität verloren geht. Hierfür wurden Hinweise auf einzelnen Bildern gefunden.



**Abbildung 4:** Radiale Dynamik einer laserinduzierten Blase bei verschiedenen Einschussphasen mit  $p_a = 55$  mbar und  $T = 3^\circ \text{C}$ . Die Blase kollabiert in den Phasen 9 bis 15 erst bei der zweiten Überdruckphase.

## Ausblick und Diskussion

Mit laserinduzierter Kavitation wurde nachgewiesen, dass sich die Kavitationslumineszenz durch Anhebung des akustischen Anregungsdrucks und Absenkung der Wassertemperatur deutlich steigern lässt. Durch weitere Auslotung des Parameterraums der Einzelblasendynamik (Änderung des statischen Drucks und der Schallfeldamplitude, Oberflächenspannung und z. B. Mehrfrequenzanregung) verbunden u. a. mit spektroskopischen Messungen kann damit der Frage nachgegangen werden, wie weit sich beim Einzelblasenkollaps die mechanische Energie des Schallfeldes in extreme, kleinskalige thermische Anregung des Mediums umwandeln lässt.

## Literatur

- [1] Brennen, C.: Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press, New York/Oxford, 1995
- [2] Kurz, T. et al: Optic cavitation in an ultrasonic field. Phys. Rev. E 74 (2006), 066307
- [3] Barber, B. et al: Sensitivity of Sonoluminescence to Experimental Parameters. Phys. Rev. Let. 72 N°9 (1994), 1380-1384
- [4] Schanz, D.: Einfluss der Wassertemperatur auf Wasserdampfgehalt, sonochemische Aktivität und Lumineszenz in schallangeregten Kavitationsblasen. DAGA 2008 Dresden, DEGA, Berlin, 2008