

Thermische Effekte beim Kollaps von laserinduzierten Kavitationsblasen

Hendrik Söhnholz¹, Thomas Kurz

Drittes Physikalisches Institut, 37077 Göttingen, Deutschland

¹ Email: hsoehn@physik3.gwdg.de

Einleitung

Der Einfluss der Temperatur auf den Einzelblasenkollaps in Wasser wird im Experiment untersucht. Dazu werden einzelne Blasen erzeugt, indem ein gepulster Laser in eine wassergefüllte Küvette fokussiert wird. Die Temperatur des Wassers wird durch einen Thermostaten geregelt. Der Blasen-kollaps wird optisch mit einer Kamera und akustisch mit einem Hydrophon untersucht. Die Wassertemperatur hat einen großen Einfluss auf den Blasen-kollaps, weil der Dampfdruck von Wasser mit steigender Temperatur stark zunimmt. Daher ist die Blase bei erhöhter Wassertemperatur zum größten Teil mit Dampf gefüllt und enthält nur wenig nichtkondensierbares Gas. Dies führt zu einem milderem, gedämpften Blasen-kollaps und die abgestrahlten Stoßwellen sind schwächer.

Es werden zunächst numerische Rechnungen zur Blasenschwingung für verschiedene Wassertemperaturen durchgeführt. Anschließend wird das Experiment beschrieben und die Ergebnisse werden mit den numerischen Rechnungen verglichen.

Numerische Rechnungen

Zur Beschreibung der sphärischen Blasendynamik wird das Gilmoremodell [1] herangezogen. Darin wird der Dampfdruck p_v des Wassers berücksichtigt. Das System von zwei gewöhnlichen Differentialgleichungen wird mit einem Runge–Kutta-Verfahren gelöst. Die Rechnungen werden mit einem Anfangsradius von $R_0 = 100 \mu\text{m}$, einer Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 230 \text{ m/s}$ und einem Gleichgewichtsradius von $R_n = 50 \mu\text{m}$ durchgeführt. Der Dampfdruck p_v wird entsprechend der Wassertemperatur gewählt. Die numerisch berechneten Lösungen der Gilmoregleichung sind in Abb. 3 dargestellt.

Experimenteller Aufbau

Ein ns-Laserpuls wird mit einem Linsensystem in eine wassergefüllte Küvette fokussiert (Abb. 1). Dort entsteht in Folge eines optischen Durchbruchs eine Blase. Die Küvette ist mit deionisiertem Wasser gefüllt und befindet sich in einer weiteren, größeren Küvette, die von heißem Wasser durchströmt wird. Ein Thermostat dient zur Einstellung und Regelung der Wassertemperatur.

Die Blase wird mit einem LED-Blitz durch eine Mattscheibe beleuchtet. Die Dauer des Beleuchtungspulses beträgt etwa $10 \mu\text{s}$. Auf der gegenüberliegenden Seite der Küvette befindet sich eine Kamera mit kurzer Verschlusszeit ($1 \mu\text{s}$) zur Aufnahme von einzelnen Bildern während der Blasenschwingung.

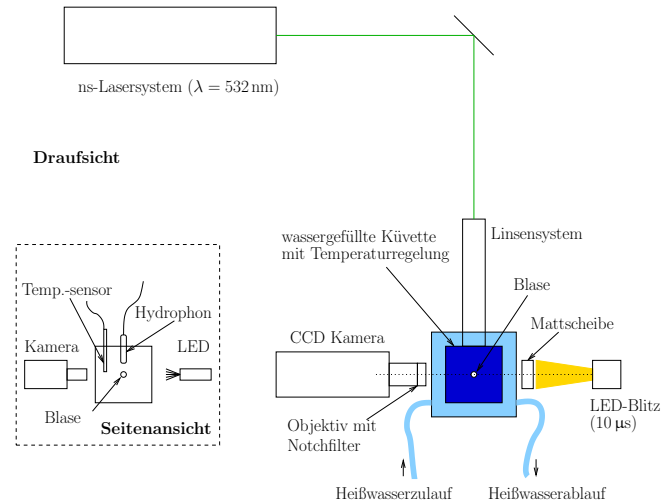


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau zur Erzeugung und Beobachtung von Kavitationsblasen

Da laserinduzierte Blasen gut reproduzierbar sind, können nacheinander viele Einzelblasen erzeugt und von jeder Blase jeweils ein Bild aufgenommen werden. Die Zeitverzögerung zwischen Blasen-erzeugung und Auslösen der Kamera wird dabei variiert, um den zeitlichen Verlauf der Blasenschwingung abzutasten.

Die von einer Blase bei ihrer Erzeugung und im Kollaps ausgesandten Stoßwellen werden mit einem Hydrophon aufgezeichnet. Aus dem Messsignal kann später die Kollapszeit der Blase bestimmt werden. Die aufgenommenen Bilder werden anhand der Kollapszeit sortiert. Wenn die Kollapszeiten verschiedener Blasen um höchstens $1 \mu\text{s}$ abweichen, werden die Blasen als gleich angesehen.

Ergebnisse

Eine erhöhte Wassertemperatur führt zu einem größeren Dampfdruck. Die Blase wächst dann zu einem größeren Maximalradius an und der erste Kollaps findet später statt, d. h. die Kollapszeit wird länger. Die Blasendynamik wird also gedämpft und langsamer. Der Kollaps ist bei hohen Wassertemperaturen nicht mehr so heftig und die emittierten Stoßwellen sind schwächer.

Die experimentell gewonnenen Radius–Zeit-Kurven stimmen teilweise mit den numerisch berechneten Lösungen überein (Abb. 3). In beiden Fällen wachsen der Maximalradius der Blase und die Kollapszeit mit steigender Wassertemperatur. Einzig die Messwerte für $T = 40^\circ\text{C}$ weichen davon ab; Grund dafür ist vermutlich ein Fehler im Experiment. Im Gegensatz zu den numerischen Ergebnissen ist in den gemessenen $R(t)$ -Daten der maximale

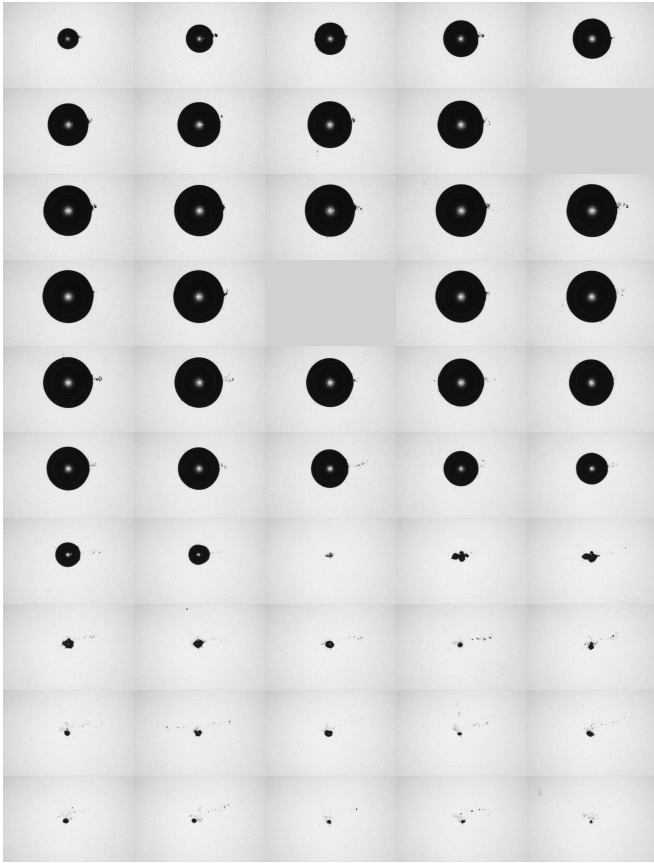


Abbildung 2: Bildserie zur Blasendynamik bei $T = 20\text{ °C}$. Bildabstand: $5\text{ }\mu\text{s}$. Das erste Bild wurde $1\text{ }\mu\text{s}$ nach der Blasenerzeugung aufgenommen. Aufgrund der Beleuchtung erscheint die Blase dunkel.

Radius in der Reboundphase, also nach dem ersten Kollaps, bei hohen Wassertemperaturen wesentlich größer.

Diskussion

Die größeren Maximalradien der Blase bei hohen Wassertemperaturen sowohl vor als auch nach dem ersten Kollaps sind auf einen erhöhten Dampfanteil im Innern der Blase zurückzuführen. Dieser kann durch Verdampfung und Diffusion von Wasserdampf durch die Blasenwand bedingt sein. Hierbei spielt möglicherweise auch das sog. *vapor trapping* [2] eine Rolle. Dabei wird in der Expansionsphase Wasser verdampft und sammelt sich in der Blase, weil im schnellen Kollaps keine Zeit zum Kondensieren des Dampfes bleibt. Außerdem wird bei erhöhten Wassertemperaturen weniger Energie für die Stoßwellenabstrahlung aufgewendet, so dass im Rebound mehr Energie zum Aufschwingen der Blase bleibt und diese einen größeren Radius erreicht als bei niedrigen Temperaturen.

Das Gilmoremodell kann den größeren Maximalradius im Rebound nicht wiedergeben. In einem erweiterten Modell sollten Verdampfung und Kondensation sowie Diffusion über die Blasenwand berücksichtigt werden. In den gemessenen Hydrophonsignalen ist eine Abnahme der Stoßwellenamplitude mit steigender Temperatur erkennbar. Dies sollte mit einem geeigneten Hydrophon (Faserhydrophon) überprüft werden. Weitere

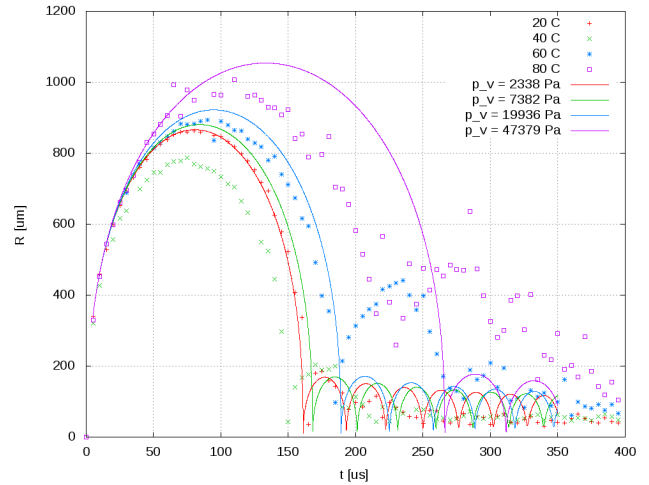


Abbildung 3: Vergleich der experimentell bestimmten Radius-Zeit-Daten mit den numerisch berechneten Lösungen der Gilmoregleichung.

Messungen werden zeigen, ob die Kurve für $T = 40\text{ °C}$ in Abb. 3 ein Ausreißer ist oder ob hier noch andere bisher nicht berücksichtigte Effekte eine Rolle spielen.

Literatur

- [1] Lauterborn, W. und Kurz, T.: Physics of bubble oscillations. Rep. Prog. Phys. 73 (2010), 106501
- [2] R. Toegel, B. Gompf, R. Pecha und D. Lohse: Does Water Vapor Prevent Upscaling Sonoluminescence? Phys. Rev. Lett. 85 (2000), 3165-3168