Untersuchungen am akustisch kavitierenden Wasserstrahl

Eric Kristkeitz, Carlos Cairós, Robert Mettin
Christian-Doppler-Labor für Kavitation und Mikroerosion, Drittes Physikalisches Institut
Georg-August-Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen
Email: RMettin@gwdg.de

Einleitung

Ein senkrecht auf eine horizontale Oberfläche gerichteter Wasserstrahl, in den Ultraschall eingekoppelt wird, kann für bestimmte Fälle eine mögliche Alternative zur Oberflächenreinigung durch Ultraschallbäder darstellen. Welche Reinigungsergebnisse man in Abhängigkeit vom Volumenstrom und der Leistung erwarten kann und welche Besonderheiten bei einem solchen Aufbau auftreten, wird im Folgenden dargestellt. Es wurden Reinigungstests an mit Partikeln verschmutzten Glasträgern durchgeführt sowie unterstützend auch die Chemilumineszenz von Luminol als Kavitationsindikator untersucht. Der Verlauf der freien Oberfläche und die Position des Hydraulischen Sprungs wurden gemessen und Simulationen zur Schallfeldausbreitung in Flüssigkeit und Substrat durchgeführt.

Aufbau

Der schematische Aufbau ist in Abb.1 dargestellt. Ein Wasserstrahl gelangt aus einer Düse senkrecht auf die horizontale Oberfläche im Abstand d. In der Düse befindet sich ein Ultraschallwandler der Frequenz 1 MHz, der eine Leistung P aufnimmt. Der Strahl breitet sich radialsymmetrisch auf der Oberfläche aus. Der Volumenstrom q und die äußere Wasserhöhe h werden so eingestellt, dass sich ein Hydraulischer Sprung (auch Wassersprung, im Folgenden WS) einstellt, der Übergang vom schießenden zum fließenden Wasser.

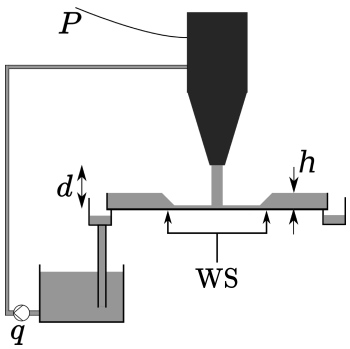

Abbildung 1: Aufbau, siehe Text.

In den Reinigungstests kommen fluoreszierende 6 µm große Melaminpartikel zum Einsatz, die stark haftend auf Glasträger aufgebracht werden. Die Ergebnisse werden wie in Abb.2 gezeigt durch Anregung mit einem Laser geeigneter Wellenlänge und passendem Filter sichtbar gemacht.

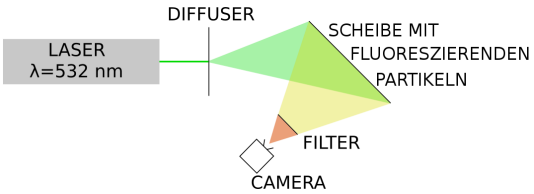

Abbildung 2: Aufbau, siehe Text.

Wassersprung und Höhenprofil

Ein Wassersprung stellt den plötzlichen Übergang von schießendem zu fließendem Wasser in einem offenen Gerinne dar. Aus Impuls- und Masseerhaltung ergibt sich für den reibungsfreien, radialsymmetrischen Fall für dessen radiale Position r_1 [Wat64]:

$$r_1 = \frac{1}{\pi^2}\frac{q^2}{h^2 g a^2} - \frac{a^2}{2h} \tag{1}$$

Hierbei ist a der Strahlradius ($a = 2\,\mathrm{mm}$ im Aufbau) und g die Gravitationsbeschleunigung. Diese Formel liefert gute Ergebnisse für kleine Radien. Korrekturterme, die versuchen die Reibung mit zu berücksichtigen, findet man ebenfalls in [Wat64]. Die Abb.3 zeigt die hier gemessenen Radialpositionen r_1 abhängig vom Volumenstrom q. Innerhalb des WS ist die Strömungsgeschwindigkeit

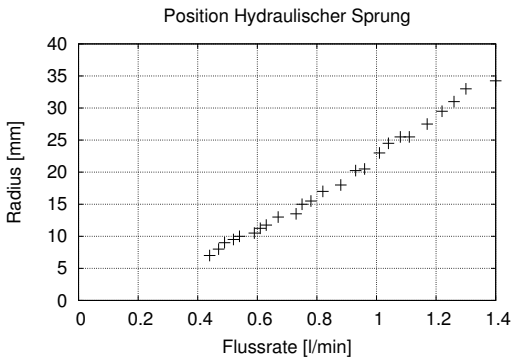

Abbildung 3: Radius WS, abhängig vom Volumenstrom für $h \approx 4.6\,\mathrm{mm}$.

größer als die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenstörungen, es liegt eine schießende Strömung mit geringer Wasserhöhe vor. Abb.4 zeigt den radialen Verlauf der Wasserhöhe für verschiedene Volumenströme. Durch Veränderung von h wird die Position des WS, nicht aber die schießende Strömung selbst verändert.

Verglichen mit der Wellenlänge $\lambda = 1.5\,\mathrm{mm}$ bei 1 MHz ist der Bereich des schießenden Wassers sehr dünn, sodass

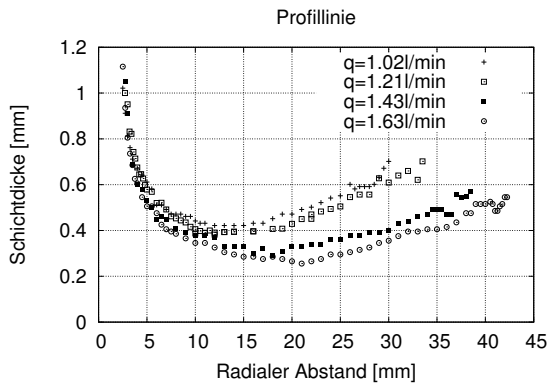

Abbildung 4: Radiale Wasserhöhe im schießenden Wasser für verschiedene Volumenströme.

man hier eine radial evaneszente Welle erwarten würde, falls am Substrat vollständige Reflexion auftritt. Dies ist aber nicht unbedingt gegeben, wie auch die nun folgenden Simulationsergebnisse zeigen.

Schallfeldsimulation

Aus Simulationen und Reinigungstests ergibt sich, dass sich das Schallfeld im schießenden Wasser und über den WS hinaus ausbreitet. In Abb.5 ist der absolute Schalldruck dargestellt. Dabei wurde das Wasser als ruhend und frei von Blasen angenommen. Grafik 6 zeigt den

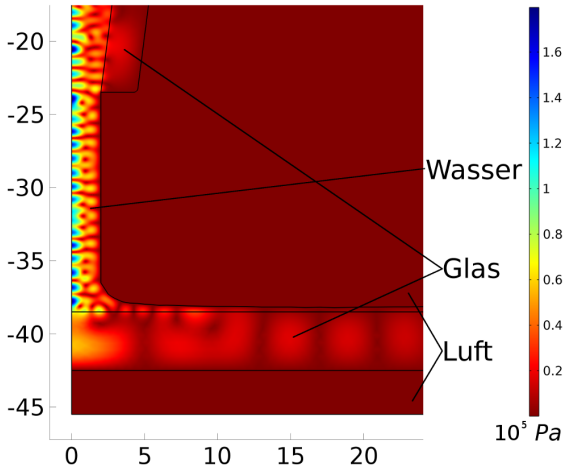

Abbildung 5: Simulation des Druckfeldes für ruhendes Fluid mit COMSOL. Längenangaben in [mm].

Verlauf des absoluten Drucks an der horizontalen Grenzfläche Wasser-Glas. Die Simulation zeigt eine stehende Welle im vertikalen Strahl und der Düse. Im schießenden Wasser liegt die Wellenlänge zunächst noch bei etwa 1.5 mm, wird ab $r \approx 10$ mm aber größer und passt sich der Wellenlänge im Glas an. Wenn die Höhe der schießenden Strömung wieder zunimmt, wird die Wellenlänge wieder kleiner. Bei $r = 38$ mm liegt der WS. Aus der Simulation ergibt sich, dass der Schall hauptsächlich über die Glasplatte geleitet wird und von dort in die schießende Strömung eindringt und sich später im fließenden Wasser wieder ausbreitet.

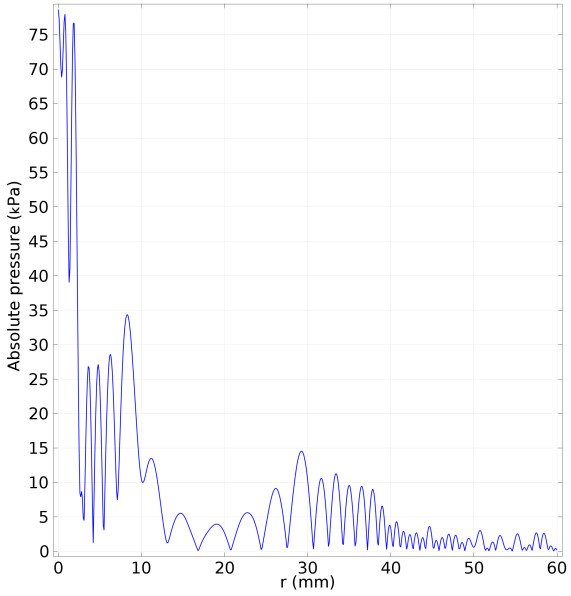

Abbildung 6: Absoluter Druck an der Grenzfläche Wasser-Glas.

Chemilumineszenz

Für Chemilumineszenzmessungen wurde eine Luminollösung aus destilliertem Wasser, Natriumhydroxid und Luminol hergestellt. Bei hinreichend starken Kavitationsereignissen entsteht Wasserstoffperoxid in den kollabierenden Blasen, das dann für ein lokales, blaues Leuchten sorgt, [Ewe80]. Die Lumineszenzstärke wird oft als Maß für die (chemische) Kavitationsaktivität benutzt und hängt davon ab, ob und wieviel H_2O_2 während des Blasenkollaps entsteht und wieviel davon in die Flüssigkeit übertritt , [Bro12], [Sus90]. Bei den hier erstellten Aufnahmen konnte zum Einen die stehende Welle im vertikalen Strahlteil mit Abstand der halben Wellenlänge bei $f = 1$ MHz beobachtet werden, Abb.7. Zum Anderen wurde ein klares volumenstromabhängiges Maximum bei Erhöhung der Leistung durchlaufen, siehe Abb.8. Chemilumineszenz im schießenden Wasser wurde nicht beobachtet.

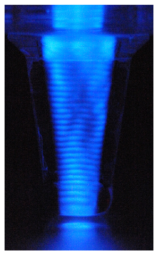

Abbildung 7: Stehendes Wellenfeld innerhalb der Düse. Mittlerer Abstand der Linien 0.75 ± 0.03 mm.

Reinigungstests

Für die Reinigungstests wurden Carboxylat-oberflächenmodifizierte mit Rhodamin-B markierte 6 µm große Melaminpartikel durch ein spezielles Verfahren auf einer Glasoberfläche fixiert. Bei $P = 0$ W,

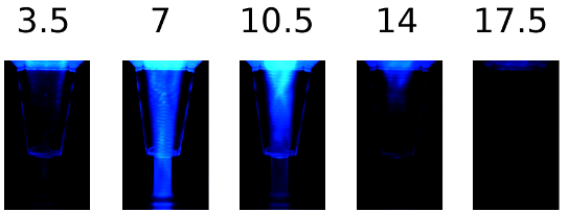

Abbildung 8: Die Zahlen geben die Leistung [W] an. Es ist überall $q = 1.4\,\mathrm{l/min}$, $d = 10\,\mathrm{mm}$, $h = 3.5\,\mathrm{mm}$.

also durch einen bloßen Wasserstrahl mit $q = 1.6\,\mathrm{l/min}$, konnten sie nicht mehr abgelöst werden. Die Verteilungsdichte zeigt Abb.9. Es wurden $50\,\mathrm{mm} \times 75\,\mathrm{mm}$

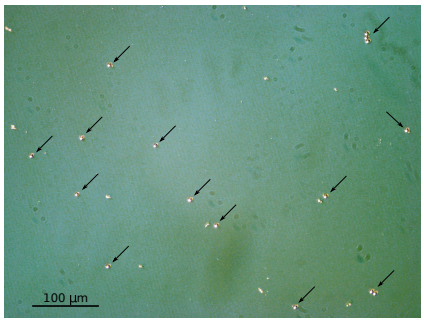

Abbildung 9: Verteilung der Partikel, 20-fache Vergrößerung.

große Glasscheiben mit den Partikeln beschichtet und bei der Reinigung für jeweils 5 s dem Ultraschallstrahl ausgesetzt. Als Ergebnis der Tests tritt bei schrittweiser Vergrößerung der Leistung eine typische Abfolge von Reinigungsstrukturen auf, die sich mit größerem Volumenstrom zu größeren Leistungen verschiebt. Eine solche Abfolge zeigt Abb.10 für den Fall $q = 1.0\,\mathrm{l/min}$. Bei $P = 0.75\,\mathrm{W}$ wird ein Bereich $r < 6\,\mathrm{mm}$ gereinigt, au-

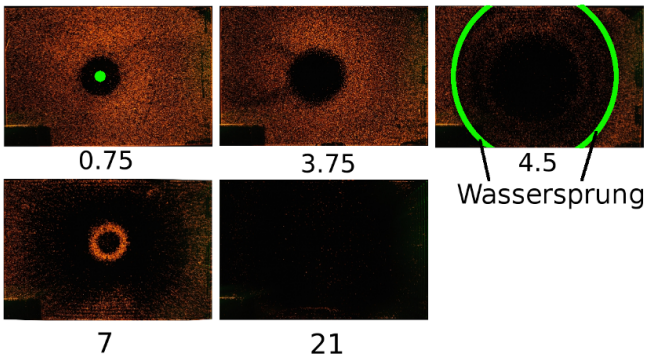

Abbildung 10: Reinigungergebnisse für unterschiedliche Leistungen, Zahlen in [W]. Reinigung entspricht dunklen Bereichen.

ßerhalb davon tritt überhaupt keine Reinigung auf, der grüne Punkt stellt den Durchmesser des Wasserstrahls dar. Bis $P = 3.75\,\mathrm{W}$ wächst der Bereich auf 10 mm an. Dann kommt es zu einer grundsätzlichen Änderung, bei $P = 4.5\,\mathrm{W}$ breitet sich der Reinigungsbereich plötzlich bis zum WS (grüne Linie) aus, wobei im Inneren Ringe schwächerer Reinigung auftauchen. Gleichzeitig ist auch schon außerhalb des WS minimale Reinigung vorhanden.

Bei $P = 7\,\mathrm{W}$ taucht ein starker Ring ohne Reinigung bei $r = 5.6\,\mathrm{mm}$ auf. Bei größerer Leistung verschindet er wieder und die Reinigung wird überall, auch außerhalb des WS stärker, sodass bei $P = 21\,\mathrm{W}$ die komplette Glasscheibe während der 5-sekündigen Reinigung von den Partikeln befreit wird. Die genannten Leistungen gelten für den Fall $q = 1.0\,\mathrm{l/min}$. Bei größerem q ist die Abfolge zu größeren Leistungen verschoben. Abb.13 zeigt einen Vergleich zwischen Chemolumineszenz CL im Strahl und der Reinigung. Im schießenden Wasser konnte nie CL beobachtet werden. Reinigung findet also unabhängig von CL statt oder die CL ist zu schwach, um sie dort nachzuweisen. Es gibt aber einen Zusammenhang zwischen CL im vertikalen Strahl und der Reinigung. Das Maximum der CL verschiebt sich mit größerem Volumenstrom q zu größeren Leistungen P, siehe Abb.11, ebenso wie sich ähnliche Reinigungsmuster

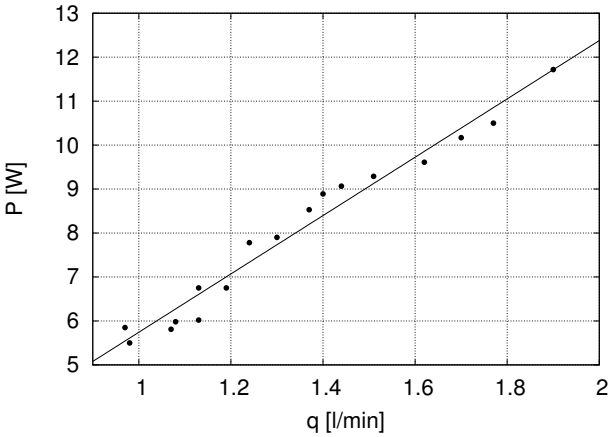

Abbildung 11: Leistung beim Maximum der CL, abhängig vom Volumenstrom.

bei größerem q zu größeren P verschieben, siehe Abb.12. Es scheint als würde bei größerem Volumenstrom weniger Leistung die Düse verlassen.

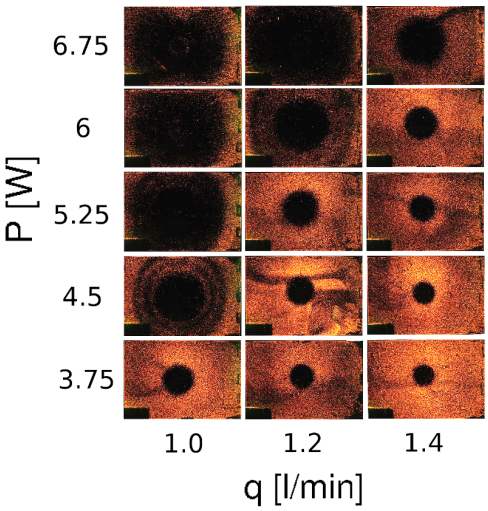

Abbildung 12: Reinigungsergebnisse dargestellt im P-q-Raum.

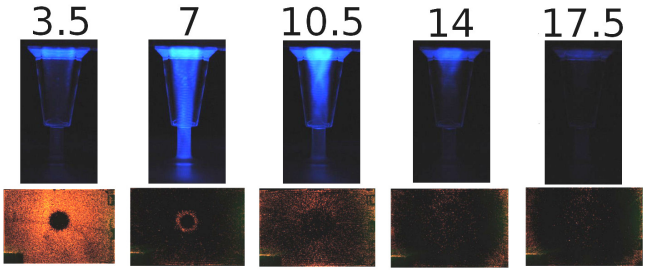

Abbildung 13: Gegenüberstellung von Reinigung und Chemilumineszenz bei $q = 1.4\,\mathrm{l/min}$. Zahlen geben die Leistung in [W] an.

Zeitabhängiges Reinigungsverhalten

Für einige P-q-Kombinationen wurde die Reinigungsdauer t_R variiert. Für jede Zeitdauer wurde eine neue Probe verwendet. Zwei Beispiele zeigt Abb.14. Zur genaueren Auswertung wurde in den Bildern die Helligkeit abhängig vom Radius ermittelt, Abb.15 zeigt den Verlauf für die obere Bildreihe. In beiden Fällen wird schon für $t_\mathrm{R} = 0.5\,\mathrm{s}$ der Bereich gereinigt, wo der Strahl unmittelbar auf die Oberfläche trifft. In der oberen Reihe ist für größere t_R deutlich der Einfluss des WS zu sehen. Auch ein starker Ring mit schwächerer Reinigung ist sichtbar. Die Reinigung ist aber auch außerhalb des WS vorhanden, denn bei $t_\mathrm{R} = 60\,\mathrm{s}$ sind bis auf den Ring alle Partikel abgelöst. Anders sieht es in der unteren Reihe aus. Hier ist zum Einen ein Einfluss des WS überhaupt nicht zu sehen, außerdem kommt es auch für große t_R zu keiner Reinigung außerhalb eines bestimmten Bereichs. Beide Fälle unterscheiden sich nur in der am Schallwandler angelegten Leistung.

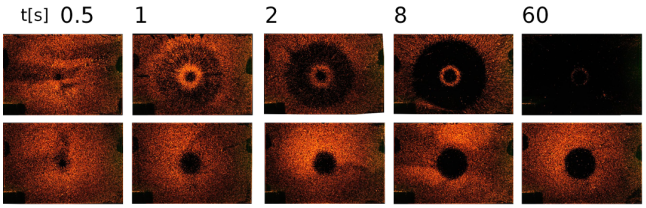

Abbildung 14: Zeitabhängige Reinigung. Obere Reihe: $q = 1.0\,\mathrm{l/min}$, $P = 7\,\mathrm{W}$. Untere Reihe: $q = 1.0\,\mathrm{l/min}$, $P = 3.5\,\mathrm{W}$.

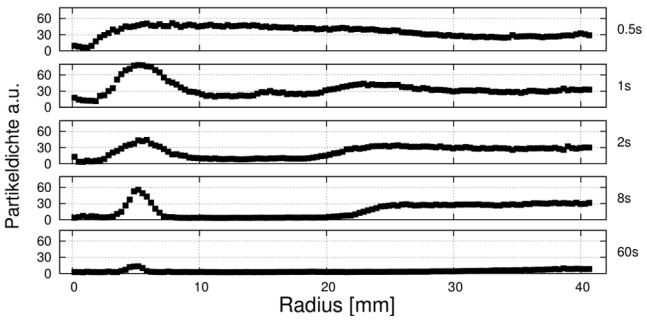

Abbildung 15: Zeitabhängige Reinigung für $q = 1.0\,\mathrm{l/min}$, $P = 7\,\mathrm{W}$.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen ergeben eine lineare Abhängigkeit der Position des WS im betrachteten Volumenstrombereich. Die schießende Oberflächenströmung ist verglichen mit der Wellenlänge $\lambda = 1.5\,\mathrm{mm}$ sehr dünn (etwa $0.3\,\mathrm{mm}$), sodass der Ultraschall hier nicht direkt eindringen kann, sondern vermutlich über die Glasplatte weitergeleitet wird. Es kommt bei Variation der Leistung zu einem klaren Maximum der CL im vertikalen Strahlabschnitt, während im schießenden Wasser keine CL beobachtet werden konnte. Ebenfalls im vertikalen Strahl ist eine deutliche Stehwelle durch die CL zu erkennen. Die Reinigungsergebnisse lassen sich grob in zwei Fälle unterscheiden. Bei geringen Leistungen wird ein wenige Millimeter großes Gebiet sehr gut gereinigt, während außerhalb davon überhaupt keine Reinigung passiert. Bei größeren Leistungen tritt gute Reinigung bis zum WS mit einigen Ringen auf, stark abgeschwächt kommt es auch außerhalb des WS zu Reinigung. Wenn an einem Ort gereinigt wird, auch wenn es nur sehr schwach ist, werden bei genügend großer Reinigungszeit alle Partikel entfernt.

Aus den Ergebnissen lässt sich u.a. schließen, dass Luminolemission keinen guten direkten räumlichen Indikator für Partikelreinigung darstellt. Außerdem sind vermutlich die akustischen Eigenschaften des Substrats wichtig für die Schallausbreitung und damit auch für die reinigenden Kavitationsereignisse an der festen Oberfläche. Ob und wie die Substrateigenschaften die Reinigung tatsächlich beeinflussen, müssen zukünftige Untersuchungen klären, ebenso die beobachteten Ringstrukturen von schlechter bzw. verzögerter Reinigung bei bestimmten Leistungen. Ein gewisser Spielraum für Optimierungen des Systems durch geeignete Parameterwahl scheint gegeben zu sein.

Danksagung: Die Autoren danken Herrn Straka (Sonosys GmbH) für die Leihgabe von Geräten sowie dem österreichischen Ministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend und der österreichischen Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung für finanzielle Unterstützung.

Literatur

[Wat64] Watson, E. J.: Tha radial spread of a liquid jet over a horizontal plane, **J. Fluid Mech. (1964), vol. 20, part 3, pp. 481-499**, 1964

[Ewe80] Ewetz, L.: Luminol Chemiluminescence and some Analytical Applications in Biochemistry and Microbiology, **FOA Reports, vol. 14, No. 1**, 1980

[Bro12] Brotchie, A., Schneider, J., Pflieger, R., Shchukin, D., Möhwald, H.: Sonochemiluminescence from a Single Cavitation Bubble in Water, **Chem. Eur. J. 2012, 18, 11201-11204**, 2012

[Sus90] Suslick, K.S., Sonochemistry, **Science, vol. 247 no. 4949 pp. 1439-1445**, 1990