

Messung von Schallfeldern in kavitierenden Medien

Christian Koch, Klaus-Vitold Jenderka, Christoph Kling

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Deutschland, Email: christian.koch@ptb.de

1. Einleitung

Kavitationsvorgänge, wie man sie sich in vielen technischen und medizinischen Anwendungen zunutze macht, sind komplexe Prozesse, die vielfältig und oft stochastisch ablaufen. Das Vielkörperproblem, das auf Grund der Wechselwirkung der vielen Blasen untereinander vorliegt, kann nicht im Allgemeinen vollständig gelöst werden. Um dennoch eine Beschreibung der Vorgänge z. B. für eine Optimierung zu ermöglichen, ist man auf integrale Parameter angewiesen, die bestimmte Eigenschaften der Kavitationswolke widerspiegeln. Die Messung des Schallfelds liefert verschiedene Möglichkeiten solche Parameter zur Verfügung zu stellen.

Der vorliegende Beitrag stellt zunächst wichtige Eigenschaften und Besonderheiten von Schallfeldmessungen in kavitierenden Medien zusammen. Danach wird auf neue Messergebnisse eingegangen, die bei Untersuchungen zur Abhängigkeit der Messergebnisse von experimentellen Parametern erhalten wurden. Dabei stand die Beurteilung des Einflusses von Seife im Vordergrund. Eine weitere Fragestellung ist der Einsatz von Schallfeldmessungen zur Qualitätskontrolle. Häufig müssen laufende Prozesse in Herstellungsverfahren geeignet und genau dokumentiert werden, um die Qualität langfristig sicherzustellen oder die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Hier ließe sich eine Schallfeldmessung einsetzen und es wurde untersucht, welche Reproduzierbarkeit dabei erreicht werden kann.

2. Messung von Schallfeldern

2.1. Messgrößen

Schallfeldmessungen lassen sich mit einer Vielzahl von Techniken, darunter optischen, thermoelektrischen oder kalorischen Verfahren realisieren. In der praktischen Anwendung haben sich Sensorverfahren mit hoher zeitlicher Auflösung als besonders nützlich erwiesen, weshalb dieser Beitrag sich auf sie konzentriert. Dabei wird ein, z. B. piezoelektrischer oder optischer Sensor in die Kavitationswolke gebracht, der zeitaufgelöst das lokale Schallfeld bestimmt. Es setzt sich aus dem treibenden, möglicherweise resonanten, Schallfeld und sekundären Feldern, die von den Blasen selbst erzeugt werden zusammen.

Für eine Nutzung von Schallfeldmessungen zur Charakterisierung der Kavitation ist es notwendig, die beiden Anteile von einander trennen zu können. Das gelingt im Frequenzbereich, in den das Zeitsignal transformiert wird. Dort kann man zunächst die Grundwelle bei der Treiberfrequenz ausmachen. Sie wird hauptsächlich vom treibenden Feld gebildet, obwohl die Blasen selbst Schall bei dieser Frequenz aussenden. In allen Experimenten haben sich diese Anteile aber als klein gegenüber der Amplitude des treibenden Feldes herausgestellt.

Weiterhin findet man im Spektrum stets höhere Harmonische, die sowohl von den Blasen als auch von Nichtlinearitäten der treibenden Wandler und dem Ausbreitungsmedium kommen können. Die Wandler erzeugen jedoch nur ungerade Harmonische, die dort auch dominieren. Die zweite Harmonische, die immer deutlich zu erkennen ist, kommt zwar von Blasenoszillationen hat sich aber als Kavitationsparameter als ungeeignet erwiesen [1].

Die auftretenden Subharmonischen stammen immer von Blasenoszillationen. Sie gelten als typischer Anzeiger von nicht-inertialer Kavitation und werden gern als Indikator dafür verwendet [2]. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass es Fälle gibt, wo ein stark wirksames Kavitationsfeld kaum Subharmonische zeigt.

Den bisher verlässlichsten Kavitationsparameter stellt das Rauschen dar, das als „Kollapsgeräusch“ der Blasen detektiert werden kann. Es ist direkt mit der Kavitationsaktivität verbunden [3] und es konnte stets eine hohe Korrelation mit Kavitationswirkungen gefunden werden. [1].

Wenn die beschriebenen Parameter für eine Messung bestimmt sind, können auch Mittelungen durchgeführt werden, um Schwankungen auf der Zeitskala von Sekunden - auf der auch Reinigung und Sonochemie ablaufen - zu minimieren. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich zumindest in diesem Rahmen stabile Verhältnisse ausgebildet haben.

2.2 Messtechnik

Für zeitlich aufgelöste Messungen stehen verschiedene Sensoren zur Verfügung. Innerhalb dieser Arbeiten wurden optische Faserspitzen [4] und piezoelektrische Hydrophone eingesetzt. Fasersensoren haben den Vorteil dass sie über sehr kleine Sensordimensionen und über eine hohe Widerstandsfähigkeit verfügen. Damit ermöglichen sie eine hohe räumliche Auflösung und können an sehr engen Stellen eingesetzt werden. Dem steht jedoch ein deutlich höherer technischer Aufwand gegenüber, so dass diese Sensoren nur in speziellen Anwendungen zum Einsatz kommen.

Piezoelektrische Hydrophone sind dagegen sehr einfach und vielseitig einsetzbar. Bei der Verwendung von Wasserschallhydrophonen, die im Allgemeinen in Gummi eingegossene Sensorelemente besitzen, ist auch eine längere Standzeit gewährleistet. Auf Grund der großen Bauform ist die räumliche Auflösung eher gering und einzelne Blasensignale können nicht detektiert werden. Im Hinblick auf eine Anwendung zur Charakterisierung technischer Prozesse ist dies jedoch nicht von Nachteil [4].

3. Schallfeldmessung zur Prozessbeurteilung: Einfluss von Reinigungsmitteln

In allen praktischen Reinigungsanwendungen werden Reinigungsmittel zugesetzt. Um den Einfluss auf Schallfeld-

messungen zu untersuchen, wurden Messungen in abgestandenem Leitungswasser, gasgesättigtem destilliertem Wasser und entgastem destilliertem Wasser mit (0,1 % Volumen) und ohne Seife (Pril) durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass alle Messungen mit Seife stärkere Schallfeldstrukturen aufwiesen. In Abb. 1 ist das Kavitationsrauschen in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe des Sensors in einer 45-kHz Wanne (Elma TI-H-5) direkt über einem der beiden Wandler in gasgesättigtem destilliertem Wasser dargestellt. Mit Seife zeigt sich eine klare Stehwellenstruktur, die ohne nicht so deutlich hervortritt. Darüberhinaus erkennt man deutlich höhere Rauschpegel. Die Seife vermindert die Oberflächenspannung in der Flüssigkeit und beeinflusst damit die Blasengröße. Die deutlichen Stehwellenstrukturen könnten darauf hinweisen, dass die Blasengrößenverteilung schmaler wird, die Blasengröße sinkt und die Blasen sich in den Druckknoten stark konzentrieren. Weiterhin werden die Seifenmoleküle als Kavitationskeime wirken und so die Zahl der Blasen erhöhen. Aber auch die Beeinflussung von Blasenstrukturen und Blasenwechselwirkungen ist wahrscheinlich, was bisher noch nicht untersucht wurde. Die erhaltenen Schallfeldergebnisse müssen nun mit den Wirkungen der Kavitation verglichen werden, um zu prüfen, inwieweit die Schallfeldparameter die geänderten Verhältnisse widerspiegeln.

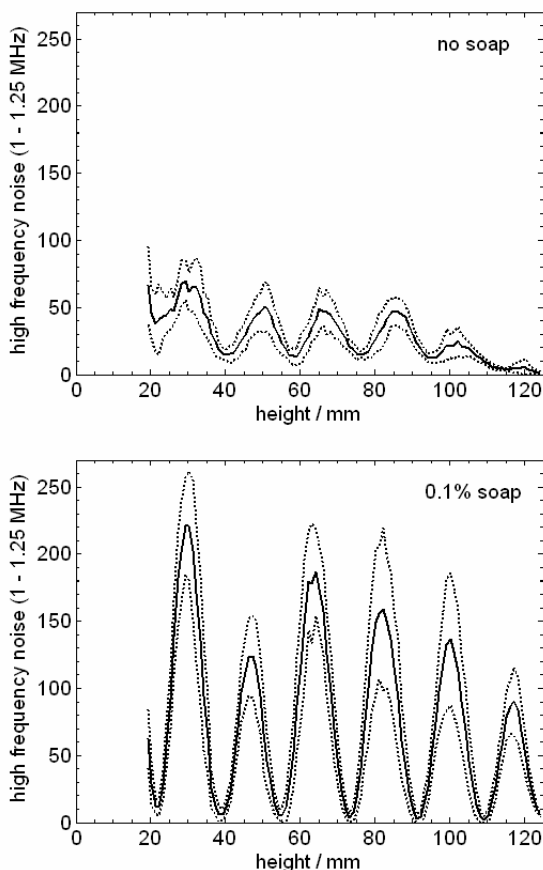


Abbildung 1: Kavitationsrauschen in einer 45 kHz Wanne in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe in destilliertem Wasser ohne (oben) und mit 0.1% Seife (unten) mit einfachen Streubreiten aus 12 Messungen (punktierter Linien).

4. Schallfeldmessung für das Qualitätsmanagement

Zur Sicherung der Produktionsqualität müssen Herstellungsprozesse genau charakterisiert und die Parameter dafür niedergelegt sein. Für kavitationsgestützte Prozesse würden sich hierfür Schallfeldmessungen anbieten, zumindest um das treibende Schallfeld und damit das Ultraschallgerät zu beschreiben. Eine Voraussetzung dafür ist die Reproduzierbarkeit der Messungen. Um hierfür belastbare Messdaten zu erhalten, wurden in einer Beispielwanne Messreihen mit bis zu 12 Versuchen in den drei oben genannten Wassersorten durchgeführt. Dabei wurden wieder Abtastungen in die Tiefe durchgeführt und verschiedene Parameter bestimmt. In Abb. 2 ist die Streubreite (relative Varianz) der Messungen, gemittelt über alle Orte dargestellt, wobei Werte, die absolut kleiner als 10% des Maximalwertes waren, ausgeschlossen wurden. Man erkennt, dass sich alle Parameter bis auf das Kavitationsrauschen mit etwa 25% Streubreite bestimmen lassen. Besonders günstig ist die Fundamentale, die sich stets am verlässlichsten bestimmen lässt. Unerwartet ist, dass die Messungen mit Seife keine verbesserten Werte liefern. Angesichts der z. T. viel ungenaueren empirischen Methoden zeigt dieses Ergebnis jedoch, dass eine Schallfeldmessung zum gegenwärtigen Stand einen akzeptablen Ansatz für eine Charakterisierung einer Reinigungswanne darstellt.

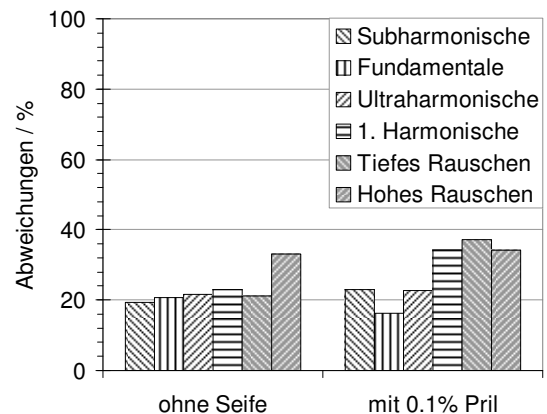


Abbildung 2: Abweichungen verschiedener spektraler Parameter aus 12 wiederholten Schallfeldmessungen in einer 45 kHz-Wanne.

Literatur

- [1] Jenderka, K.-V., Koch, Ch.: Ultrasonics 44 (2006), e401-e405
- [2] Neppiras, E. A.: IEEE Trans SU-15 (1968), 81-88
- [3] Bebachuk, A. S., Borison, I. I., Rozenberg, L.-D.: Sov. Phys. Acoust. 4 (1958), 372-373
- [4] Koch, C., Jenderka, K.-V.: Ultras. Sonochem 15 (2008), 502 – 509