

Messung und Vergleich verschiedener Effekte von Kavitation für eine quantitative Beurteilung von Anwendungsprozessen

Matthias Jüschke, Christian Koch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Bundesallee 100,

E-Mail: matthias.jueschke@ptb.de

Einleitung

Ultraschallbäder und -reaktoren, deren Wirkungsweise auf Kavitation beruht, werden in der Industrie, Medizin und in Privathaushalten seit langem verwendet. Die Betriebsgrößen der Geräte basieren dennoch vor allem auf langen Versuchsreihen und den Erfahrungen der jeweiligen Hersteller. Dies liegt sowohl an der statistischen Natur der Kavitation, als auch an der Abhängigkeit der Kavitationswirkungen von einer Vielzahl von Umgebungsparametern.

Im vorgestellten Projekt soll eine quantitative Beschreibung von Kavitationswirkungen ermöglicht werden, indem sie auf messtechnisch leicht zu erfassende Größen zurückgeführt werden. In diesem Artikel wird der Versuchsaufbau und die Erfassung der Messgrößen näher beschrieben. Ein zugehöriger Artikel geht auf die Auswertung der Daten mit einem statistischen Verfahren ein [1].

Messaufbau

In Abbildung 1 ist der Aufbau des verwendeten Ultraschallbades schematisch gezeigt. Das Wasser im Bad, das 4 l Fassungsvermögen hat, wird kontinuierlich mit dem Wasser in einem temperierbaren, großen Vorratsbehälter getauscht, so dass Änderungen der Temperatur oder des Sauerstoffgehaltes nur sehr langsam erfolgen. Mit einem Überlauf wird der Wasserstand dabei konstant gehalten. Eine Folie beruhigt die Wasseroberfläche, die ansonsten durch die Schallstrahlungskraft des Ultraschalls in Bewegung gerät. Im Überlauf werden die Temperatur und der Sauerstoffgehalt des Wassers gemessen. Die Anregungsfrequenz beträgt 44,3 kHz. Die elektrische Leistung der Wandler wird durch die Messung des Stromes mit einer Stromzange und der Spannung mit einem Oszilloskop durchgeführt.

Für das Bad wurde deionisiertes Wasser verwendet. Als Parameter wurden die Leistung der Wandler, die Temperatur und der Sauerstoffgehalt des Wassers variiert. Im Bad

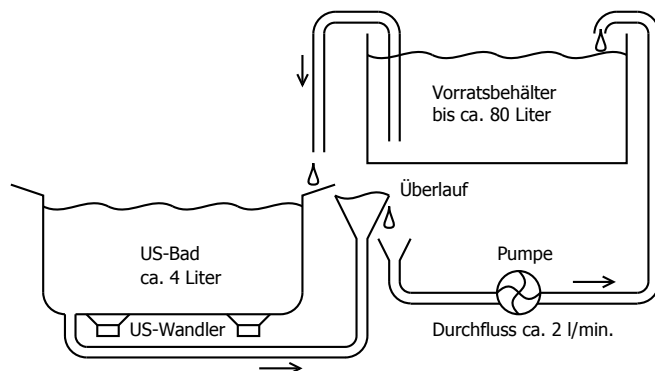


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung.

fanden Messungen an bis zu sieben verschiedenen Positionen statt.

Schallfeldmessungen

Das Schallfeld wurde mit einem Hydrophon (Reson TC4013) erfasst, das sich in vorangehenden Arbeiten als einfach zu verwenden und auch bei Kavitation stabil erwiesen hat [2]. Aus dem Hydrophonsignal wurden verschiedene Größen bestimmt: die Amplituden der Fundamentalen, der Subharmonischen, der Ultraharmonischen und der 2. Harmonischen sowie das Rauschen im Frequenzbereich von 100 bis 200 kHz und der RMS-Schalldruck.

Messung von Erosion an Aluminiumfolie

Als empirische Messmethode ist die Bestimmung der Erosionswirkung an Aluminiumfolie verbreitet. Um quantitativ verwertbare Ergebnisse zu erhalten, wurde eine Folie mit definierten Eigenschaften verwendet, die aus Rein-Aluminium der Legierung 1200, weich, glatt mit einer Stärke von 15µm besteht. Die Folien wurden zugeschnitten in einen Rahmen gespannt und dem Kavitationsfeld für 20 s ausgesetzt.

Die beschallten Folien wurden mit einem Flachbettscanner abgescannt und mit einer speziell entwickelten Software ausgewertet [3]. Dabei wurden verschiedene Erosionsarten unterschieden: als schwächster Kavitationseinfluss Dellen, die noch keinen Defekt an der Oberfläche darstellen und über einen Helligkeitsgradienten bestimmt werden. Grate sind als scharfkantige Defekte durch große Kontraste zu erkennen. Schließlich sind Löcher in der Folie durch einen farbigen Hintergrund beim Scannen auffindbar. Diese drei Größen wurden zur weiteren Auswertung zu einer Erosionszahl zusammengefasst, in der die Dellen einfach, die Grate dreifach und die Löcher als stärkste Schädigung fünffach gewertet werden. Diese Wichtungsfaktoren sind willkürlich gewählt, sie haben sich aber in der weiteren Auswertung als angemessen erwiesen [1].

Sonolumineszenz mit Luminol

Bei implodierenden Kavitationsblasen kann Lumineszenz auftreten. Der Effekt wird durch Zugabe von Luminol verstärkt. Zur quantitativen, ortsaufgelösten Bestimmung der Lumineszenz wurde eine alkalische Luminollösung in Probenröhrchen aus Polyethylen (PE) gefüllt. Die Röhrchen wurden im Ultraschallbad positioniert und die Lumineszenz wurde im abgedunkelten Labor mit einer lichtempfindlichen EMCCD-Kamera aufgenommen. Über die bekannte Position des Röhrchens ließ sich die Helligkeit an der Röhrchenposition durch Subtraktion der Intensität des Hintergrundleuchtens im Bad (ohne Luminol) bestimmen.

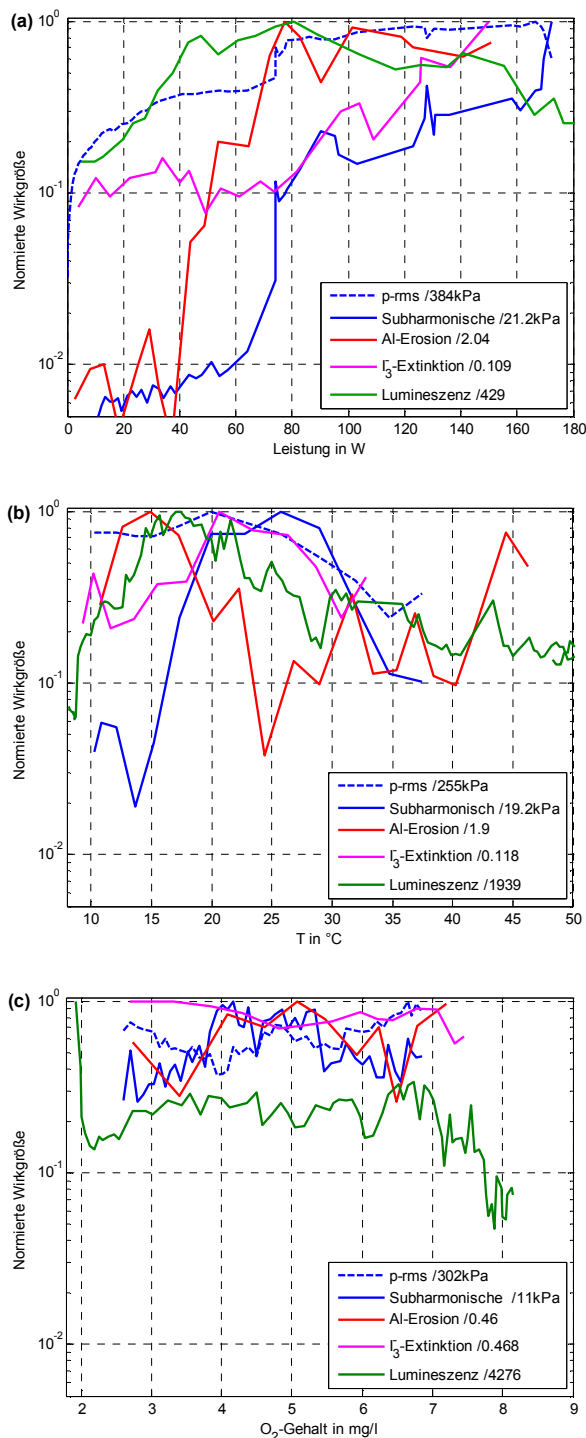


Abbildung 2: Quantitativ erfasste Kavitationswirkungen in Abhängigkeit von (a) der elektrischen Leistung der Ultraschall-Wandler, (b) der Temperatur und (c) dem Sauerstoffgehalt. Die einzelnen Wirkgrößen sind auf ihre Maximalwerte normiert, die Normierungsfaktoren sind in der Legende angegeben.

Sonochemische Wirkung

Als Modellreaktion für die sonochemische Wirkung wurde die Weissler-Reaktion gewählt. Dazu wurde eine 0,5 molare Lösung von Kaliumjodid (KI) vorbereitet und zur orts aufgelösten Messung in PE-Proberöhren gefüllt. Diese wurden an eine definierte Position in dem Ultraschallbad gebracht und für vier Minuten beschallt.

In der Lösung sind I^- -Ionen enthalten, die durch Kavitation zu I_2 -Molekülen oxidieren können. Diese bilden mit verbleibenden I^- -Ionen einen I_3^- -Komplex, der spektrometrisch ausgewertet wird. Der Komplex hat ein Extinktionsmaximum um 352nm [3]. Die gemessene Extinktion ist ein Maß für die sonochemische Aktivität, an der Position in dem Bad.

Ergebnisse und Ausblick

Die vorgestellten Wirkgrößen wurden in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung der Wandler, von der Temperatur und vom Sauerstoffgehalt des Wasser gemessen. Eine Auswahl der Größen ist in den Abbildungen 2a-c dargestellt.

In Abb. 2a ist bei Steigerung der elektrischen Leistung sehr deutlich ein Schwellenwert-Verhalten für die Erosionswirkung an der Al-Folie und bei der Subharmonischen zu sehen. Die nötige Leistung für das Überwinden der Schwelle ist dabei unterschiedlich. Bei den anderen Größen erfolgt ebenfalls ein schwellenartiger Anstieg, der weniger stark ausgeprägt ist.

Die Kurvenverläufe bei Variation der Temperatur sind weniger eindeutig, s. Abb. 2b. Die Maximalwerte der meisten Größen liegen im Bereich von 15 bis 20 °C, die Subharmonische hat ihr Maximum bei 25 °C. Bei der Erosion von Al-Folie kommt es bei großen Temperaturen wieder zu einem Anstieg.

Die Wirkgrößen in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt sind in Abb. 2c aufgetragen. Der Sauerstoffgehalt hat nur einen geringen Einfluss auf die Wirkungen. Die größte Variation weist die Lumineszenz auf, im Bereich von 2 bis 7 mg/l ist sie nahezu konstant. Für größere Werte nimmt sie ab. Der Normierungsfaktor ist hier etwa zehnfach größer als bei der Leistungsabhängigkeit (Abb. 2a).

Um Zusammenhänge zwischen den Wirkgrößen quantitativ fassen zu können, wurde in einer gesonderten Arbeit eine Faktorenanalyse der Messdaten durchgeführt. Bei der weiteren Auswertung wurde darauf abgezielt, Wirkgrößen aus leicht zugänglichen Messdaten vorhersagen zu können [1].

Die Arbeiten erfolgten im Rahmen des IGF-Vorhabens 15068 N der DECHEMA, das über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde.

Literatur

- [1] Koch, C.; Jüschke, M.: Multivariate Datenanalyse zur objektiven Beschreibung von Kavitationsanwendungen, DAGA 2011.
- [2] Jenderka, K.-V.; Koch, C.: Investigation of spatial distribution of sound field parameters in ultrasound cleaning baths under the influence of cavitation, Ultrasonics 44 (2006), pp. e401-e406
- [3] Kling, C.; Koch, C.; Jenderka, K.-V.: Space-resolved sonochemistry in cleaning vessels in comparison to mechanical effects, DAGA 2009