

Qualifizierung von Ultraschallreinigungsgeräten

Matthias Köchel, Andreas Richter, Reinhard Sobotta

Elma Schmidbauer GmbH, D-78224 Singen

Einleitung

Die Ultraschall-Tauchreinigung basiert hauptsächlich auf der Wirkung von Kavitation. Um die Reinigungswirkung zu charakterisieren, ist es daher sinnvoll, die Wirkung der Kavitation messtechnisch zu erfassen. Für die Funktion eines Ultraschallgerätes sind die Komponenten Ultraschall-Generator, -Wandler und Schallfeld wichtig. Das Schallfeld lässt an den Orten, wo die Kavitationsschwelle überschritten wird Kavitation entstehen. Es wird nun auf die Besonderheiten der einzelnen Gerätekomponenten eingegangen.

Ultraschall-Generator und -Wandler

Der Generator erzeugt in der Regel mittels einer geschalteten Spannungsquelle ein niederohmiges Signal, das an einen kompensierten piezoelektrischen oder magnetostriktiven Wandler abgegeben wird. Der Ultraschall-Generator regelt dabei die Frequenz des Signals passend zu der Resonanz- oder Antiresonanzfrequenz des Ultraschallwandlers. In einem zweiten Regelkreis wird die abgegebene Wirkleistung entsprechend der Vorgabe auf den Sollwert geregelt. Damit der Ultraschall-Generator mit hohem Wirkungsgrad arbeiten kann, wird außerdem die Phasenlage zwischen Strom und Spannung am Ausgang gemessen und optimiert. Somit arbeiten im Ultraschall-Generator drei Regelkreise zusammen. Die Leistungsabgabe erfolgt schließlich über den Wandler an eine Flüssigkeit, die dadurch kavitiert und somit ein nichtlineares, zeitvariantes System bildet. Um einen hohen Wirkungsgrad des Generators zu erreichen, wird das elektrische Signal als Rechteck mit der entsprechenden Arbeitsfrequenz des Ultraschallwandlers erzeugt. Die Arbeitsfrequenz wird allerdings ständig durch die Frequenzregelung und durch entsprechende Modi wie z. B. Sweep oder Burst frequenzmoduliert. Hierdurch werden die Schalldruckmaxima und -minima im Bad räumlich

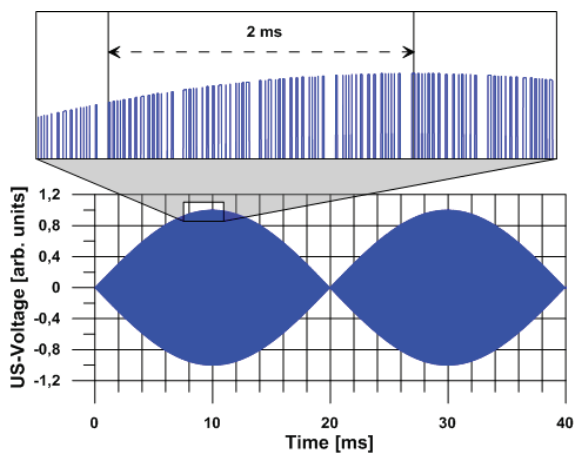


Abb. 1: Zeitliche Darstellung des amplituden- und frequenzmodulierten Rechtecksignals

moduliert, wodurch sich eine gleichmäßigere Verteilung der Kavitation ergibt.

Zusätzlich ist das frequenzmodulierte Rechtecksignal in der Praxis wie in Abbildung 1 gezeigt amplitudenmoduliert. Die Frequenzmodulation ist im Signalausschnitt in den enger und weiter werdenden Lücken zu erkennen. Die Amplitudenmodulation wird z. B. durch eine entsprechende Gleichrichtung (Halbwelle oder Doppelhalbwelle) der Versorgungsspannung der Endstufe erreicht. Gelegentlich wird diese Modulation auch mit einer definierten Einhüllenden z. B. Dreieck- oder Rechteck-Funktion versehen.

Ein einzelner kompensierter Ultraschallwandler oder eine Gruppe davon überträgt das Signal mit hohem Wirkungsgrad in die gekoppelte Flüssigkeit. Da die Wandler als „Feder-Masse-System“ oder Wellenleiter aufgebaut sind, stellt die Übertragungsfunktion quasi ein Filter 2. Ordnung für die Grundwelle dar. Oberwellen des Signals können je nach Übertragungsfunktion reflektiert oder übertragen werden. Bei sehr hohen Signalamplituden sollte berücksichtigt werden, dass die Polarisierung gegenüber dem elektrischen Feld eine Hysterese aufweist und das Material nichtlinear reagieren kann.

Schallfeld und Kavitation

Der Ultraschall-Wandler ist in der Regel an einem Becken oder an einem Blech vollflächig befestigt, über das er die mechanische Energie an eine Flüssigkeit abgeben kann. Die sich ausbreitende Welle wird an der Wasseroberfläche reflektiert. Bei dünnem Blech ergibt sich auch aus dem Übergang Flüssigkeit – Stahl – Luft eine schallweiche Totalreflektion des Schalldrucks. Eine Ultraschallwanne kann also akustisch mit einem Hallraum verglichen werden.

In Abbildung 2 a) ist ein aufgeschnittenes Ultraschallgerät zu sehen, dass auf der Seite liegt. Der Schalldruckpegel wird im Folgenden in der eingezeichneten Ebene senkrecht zum Wandler berechnet. Berechnet wird das Integral über das Geschwindigkeitspotential einzelner Elementarstrahler (Punktquellensynthese). Die kolbenförmige Abstrahlung des Ultraschallwandlers wird durch eine Anordnung von 4 Kugelstrahlern approximiert. Außerdem werden allseitig und in den Ecken Spiegelquellen angenommen, die die Totalreflektion berücksichtigen.

Das berechnete Schallfeld nach Abbildung 2 b) zeigt eine Überlagerung von Stehwellen in allen Raumrichtungen. Außerdem ist die Überlagerung des Nahfeldes des Ultraschallwandlers zu erkennen. Die Schwelle für transiente Kavitation wird nun berechnet und in die Grafik eingerechnet. In Abbildung 2 c) werden Raumbereiche in denen die Kavitationsschwelle überschritten wird, schwarz gekennzeichnet. So ergibt sich ein Muster für die räumliche Verteilung der Kavitationszonen. Eine homogene Verteilung der Kavitation hängt also von einer gleichmäßigen

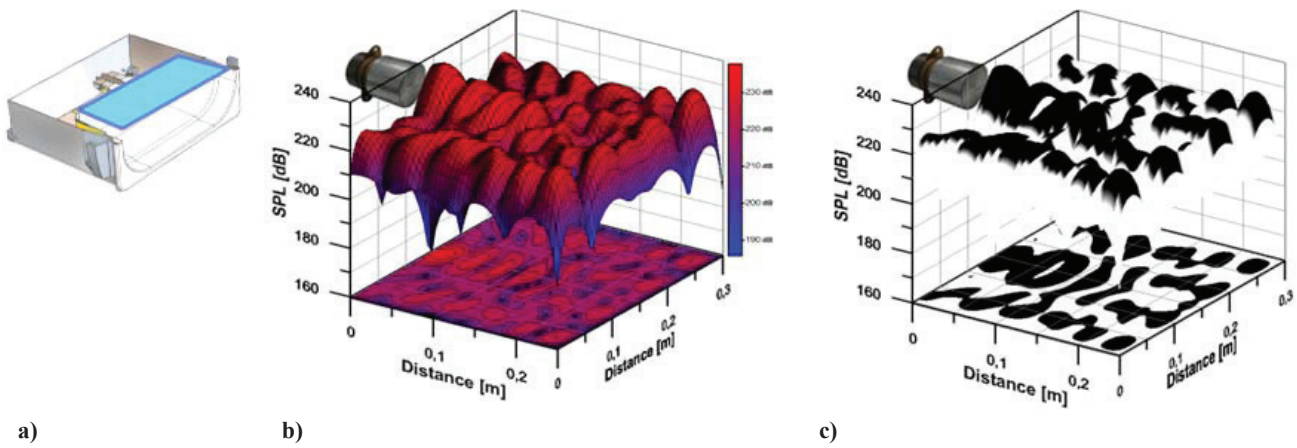


Abb. 2: Berechnete Schalldruckpegelverteilung b) und Verteilung der Kavitationszonen c) in einer senkrechten Ebene vor einem Ultraschallwandler mit reflektierenden Grenzflächen gemäß einer geometrischen Anordnung nach a).

Verteilung der Minima und Maxima ab. Es ist allerdings zu bedenken, dass der maximal berechnete Schalldruck in der Praxis nicht erreicht werden kann, da der Energieentzug durch die einsetzende Kavitation den Schalldruck begrenzt. Somit ändert sich die Schallfeldimpedanz in den Kavitationszonen.

In der Nähe eines Schalldruckmaximums kann eine Kavitationsstruktur entstehen, wie sie in Abbildung 3 gezeigt wird. In einem durchsichtigen Versuchsaufbau wurde diese dynamische variierende Struktur mit einem Durchmesser von ca. 40 mm bei 27 kHz unter der Wasseroberfläche stabil erzeugt. Diese Struktur kann auf sehr unterschiedliche Art und Weise quantitativ beschrieben werden.

Kavitations-Messverfahren

Kavitation kann über die primäre Wirkung z. B. die Messung des Schalldrucks, eine Temperaturmessung oder die Messung der Blasenaktivität quantitativ gemessen werden [1]. Als sekundäre Effekte sind die Erosion einer Aluminiumfolie und die sonochemische Dosimetrie weit verbreitet. Auch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit oder Lumineszenz wird als Nachweisverfahren eingesetzt. Viele dieser Nachweisverfahren summieren allerdings die Wirkung der Kavitation und geben somit eine Dosis wieder. Nur wenige Messverfahren geben einen Momentanwert oder einen Kurzzeit-Mittelwert der Kavitationswirkung wieder.

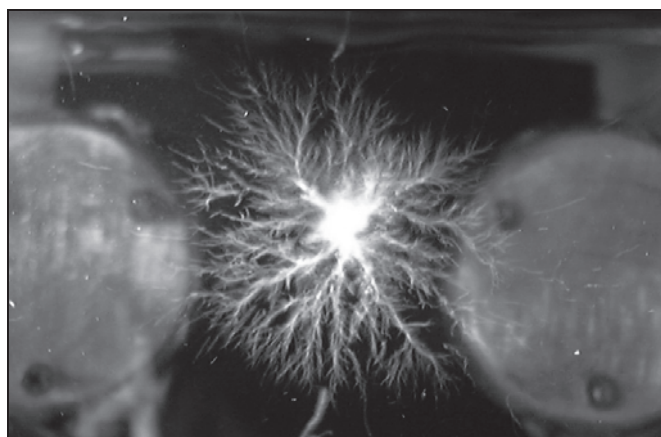


Abb. 3: Foto einer beleuchteten Kavitationsstruktur bei 27 kHz

Die breitbandige Messung des Schalldrucks und frequenz aufgelöste Bewertung kann den Momentanwert wiedergeben.

Akustische Kavitations-Messgeräte

Es werden viele unterschiedliche akustische Messgeräte zum Nachweis von Kavitation angeboten. Die Spanne reicht vom einfachen selbst gebastelten Sensor bis zum kalibrierten Hydrophon, und vom analogen Voltmeter bis zum Spektralanalysator. Einige Geräte geben den Messwert in nicht nachvollziehbaren Einheiten an oder versuchen dem Kundenwunsch entsprechend eine volumenspezifische Leistungsdichte anzugeben. Die Erfahrung hat aber gezeigt, dass eine spektrale Bewertung einzelner Frequenzkomponenten notwendig ist.

Akustische Kenngrößen

In Abbildung 4 (oben) ist der Schalldruckpegel eines typischen Kavitationsgeräusches über der Frequenz dargestellt. Gekennzeichnet sind die Arbeitsfrequenz ↓, die

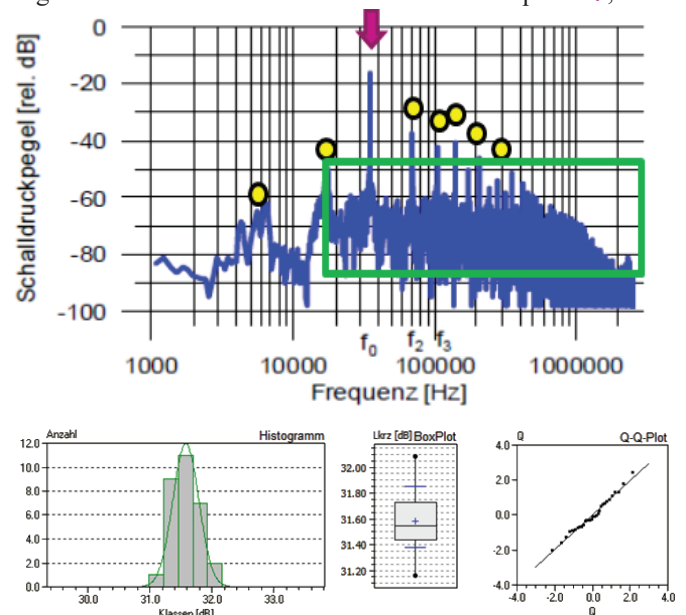


Abb. 4: Spektrum des Kavitationsgeräusches (oben) mit Markierung der charakteristischen Größen und Statistik des Rauschpegels (unten).

subharmonischen Anteile und Oberwellen \bullet und das breitbandige Kavitationsrauschen \square . Im Frequenzbereich können nun die folgenden Messwerte ermittelt werden [2]:

- Arbeitsfrequenz f_0
- Schalldruckpegel bei f_0
- Schalldruckpegel bei $f_0/2$
- Median des Rauschpegels im Bereich $f_0 \cdot 2.25$
- Spitzenwert des Rauschpegels

Der Spitzenwert des Rauschpegels kann über eine Kurzzeit-FFT ohne Mittelung berechnet werden und ist ein Maß für die Amplitudenmodulation. Es wird vorgeschlagen, das Kavitationsrauschen in einem technisch leicht zugänglichen Frequenzbereich bei $f_0 \cdot (2.25 \pm 0.1)$ oder $f_0 \cdot (4.25 \pm 0.1)$ als Median zu messen. Wenn außer der subharmonischen Schwingung auch noch die Pegel der Oberwellen berücksichtigt werden sollen, ist zu beachten, dass auch Oberwellen des Rechtecksignals diese Pegel beeinflussen.

Außerdem ist es sinnvoll den zeitlichen Verlauf der Rauschpegel statistisch auszuwerten (s. Abb. 4 unten). Die zeitliche Verteilung der Rauschpegel sollte einer Gaußschen Verteilung folgen. Ausreißer bzw. eine nicht Gaußsche Verteilung weisen auf eine Fehlmessung oder ein technisches Problem des Ultraschallgerätes hin.

Wahl des Hydrophons

Die Größe und das Material des Hydrophons spielen bei der Messung des Rauschpegels eine wichtige Rolle. Wenn Blasen quasi an einer großen Hydrophon-Oberfläche „haften“, wird von diesem Hydrophon ein mittlerer Rauschpegel mit geringer Ortsauflösung bzw. räumlicher Dynamik gemessen. Abbildung 5 zeigt den Unterschied in der Ortsauflösung eines großen Chloropren-ummantelten Hydrophons im Vergleich zu einem kleinen Stahl-Sonden-Hydrophon. Mit dem Sonden-Hydrophon kann die Kavitationsstruktur ortsaufgelöst gemessen werden. In der Regel wird die Struktur aber durch den Warenträger und das

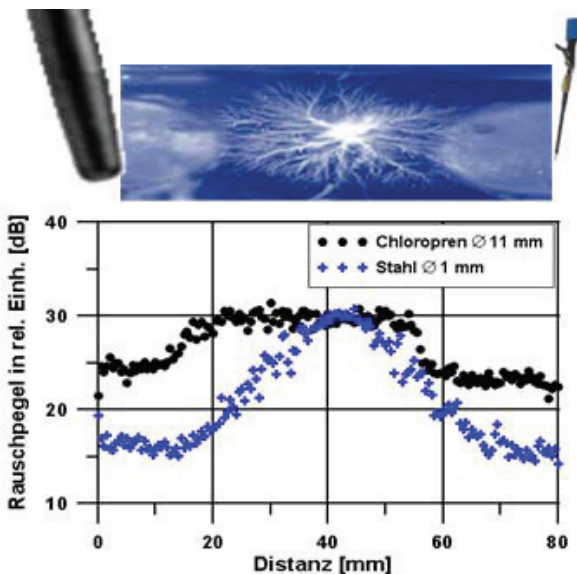


Abb. 5: Messung des Kavitationsrauschpegels in einer Kavitationsstruktur mit unterschiedlichen Hydrophonen

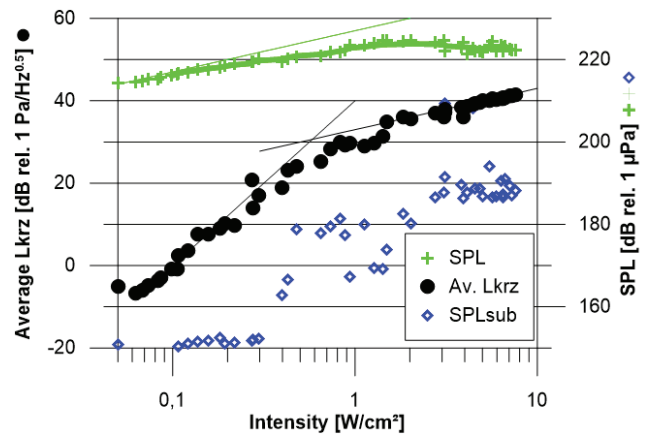


Abb. 6: Intensitätsabhängigkeit des Schalldruckpegels bei der Arbeitsfrequenz, des Rauschpegels und des Pegels der Subharmonischen

Reinigungsgut beeinflusst. Eine ortsaufgelöste Messung der Kavitationsstrukturen ist daher zur Charakterisierung der effektiven Wirkung in einem Ultraschallbecken in den meisten Fällen nicht sinnvoll.

Messergebnisse

Die Abhängigkeit des Rauschpegels von der vom Ultraschallwandler abgegebenen Intensität ist in Abb. 6 dargestellt. Der Rauschpegel steigt bis zur Kavitationsschwelle mit 4. Ordnung an. Oberhalb der Schwelle ist ein intensitätsproportionaler Anstieg 1. Ordnung messbar. Der ebenfalls dargestellte Schalldruckpegel bei der Ultraschallfrequenz steigt bei kleinen Intensitäten mit 1. Ordnung. Im Bereich der Kavitationsschwelle wird der Anstieg kleiner und geht in die Sättigung. Danach fällt der Schalldruckpegel mit steigender Intensität wieder. Der maximale Schalldruckpegel ist physikalisch nur erklärbar, wenn berücksichtigt wird, dass die Impedanz des Fluids durch die schwingenden Blasen verändert wird. Der Pegel der subharmonischen Schwingung steigt im Bereich der Kavitationsschwelle ebenfalls an, und kann deshalb auch als Indikator für Kavitation genommen werden.

Zusammenfassung

Zur Qualifizierung von Ultraschallreinigungsgeräten muss ein geeignetes Messverfahren ausgewählt werden, das auch die unterschiedlichen Signalformen des Ultraschalls berücksichtigt. Gut geeignet sind Verfahren, die den Momentanwert der Kavitation quantitativ beschreiben. Auf dieser Basis wurden Möglichkeiten und Grenzen eines akustischen Messverfahrens zusammen mit Messergebnissen gezeigt.

Literatur

- [1] Verhaagen, Rivas: Measuring cavitation and its cleaning effect, Ultrasonics Sonochemistry, März 2015
- [2] Sobotta R, Jung Ch.: Messung der Kavitationsrauschzahl, Fortschritte der Akustik, p. 581, 2005.