

Detaillierte Darstellung der digitalen Signalverarbeitung zur Messung des Kavitationsrauschpegels

Matthias Köchel, Reinhard Sobotta, Andreas Richter

Elma Schmidbauer GmbH

Einleitung

Nutzer von Ultraschallreinigungsgeräten und -anlagen benötigen häufig eine Möglichkeit, die Reinigungsleistung ihrer Geräte quantitativ zu bewerten. Dafür wird ein Verfahren vorgestellt, das das akustische Rauschen der Kavitation misst, die Messergebnisse digital weiterverarbeitet und in geeigneter Form darstellt. Dabei werden die einzelnen Prozessschritte der digitalen Signalverarbeitung dargestellt und erläutert. Am Ende der Berechnung wird der Wert so modifiziert, dass Servicetechniker eine psychologisch leicht zu beurteilende Größe erhalten.

Zum Abschluss werden beispielhaft einige Ergebnisse des Verfahrens aufgezeigt und diskutiert.

Kavitation als Wirkmechanismus zur Reinigung

Bei Ultraschallreinigungsgeräten wird Kavitation zum Lösen von Schmutz von Oberflächen verwendet. Kavitation entsteht zum Beispiel, wenn ein wässriges Flüssigkeitsbad mit Schwingungen von Ultraschallwandlern im Frequenzbereich von 25 kHz bis 150 kHz angeregt wird. Dabei werden oszillierende Dampfblasen erzeugt, die ab einer ausreichenden Ultraschallintensität implodieren können. Man bezeichnet den Effekt als transiente oder inertielle Kavitation [1]. Der bei der Implosion entstehende Impuls trägt einerseits zur Reinigung bei, andererseits erzeugt er ein akustisches breitbandiges Rauschen, welches mit einem Hydrophon gemessen werden kann.

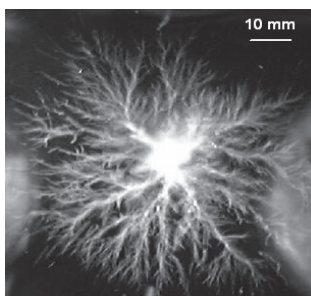


Abbildung 1: Kavitationsstrukturen im Wasser erzeugen ein komplexes Schalldrucksignal

Das Hydrophon muss dabei dem im Bad vorkommenden Ultraschalldruck von ca. 300 kPa, den Temperaturen bis 80°C sowie dem Einfluss der verwendeten Reinigungschemie standhalten und weiterhin über ausreichend Bandbreite (bis ca. 500 kHz) verfügen.

Digitale Signalverarbeitung

Das Hydrophon wird langsam und mäanderförmig durch das Bad bewegt und erzeugt dabei ein dem Schalldruck proportionales Ausgangssignal. Dieses wird verstärkt, gefiltert um Aliaseffekte zu vermeiden und von einem A/D-Wandler digitalisiert. Die Werte werden mit einer Samplingrate von 1 MHz über einen Zeitraum von 100 ms in einen digitalen Datenspeicher eingelesen.



Abbildung 2: Aufbau zur Messung des Kavitationsrauschpegels mit Ultraschallgerät, Hydrophon, Vorverstärker, AD-Wandler und PC.

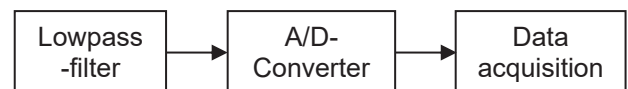


Abbildung 3: Erste Schritte der Datenverarbeitung

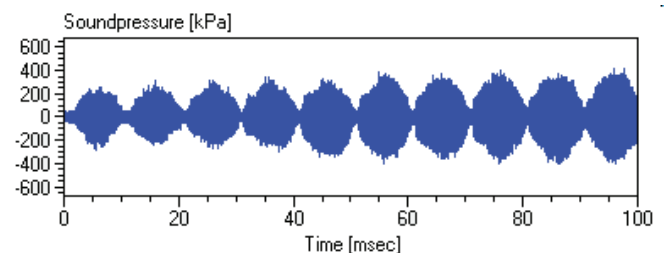


Abbildung 4: Erfasste Daten im Zeitbereich

Abbildung 4 zeigt die im Speicher abgelegten Schalldruckwerte. Diese sind mit 100 Hz moduliert, da der Ultraschallgenerator einen Brückengleichrichter zur Gleichrichtung der Spannung des Versorgungsnetzes von 50Hz enthält.

Bevor diese Werte mit einer schnellen Fouriertransformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert werden, werden sie mit einer Fensterfunktion gewichtet. Als Fensterfunktion wird die von Hann Funktion verwendet, da sie einen guten

Kompromiss zwischen Dynamik und Frequenzauflösung bietet. Die zeitliche Dauer des Fensters beträgt $t_w = 2^{13} \mu s = 8192 \mu s$. Diese Werte werden fouriertransformiert, wobei sich eine Frequenzauflösung von $f_w = 1/t_w \approx 122 \text{ Hz}$ ergibt, und die Quadrate der Beträge der Frequenzamplituden berechnet. Die FFT wird mit einem zeitlichen Versatz von $4096 \mu s = 24$ mal ausgeführt. Auf Grund des Verlaufs der von Hann Funktion werden damit alle Werte (bis auf den Anfang und das Ende) gleich gewichtet.

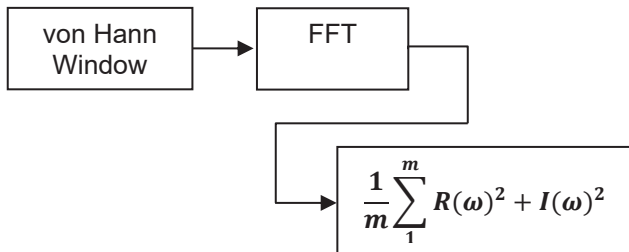


Abbildung 5: Verfahrensschritte bei der FFT

Als Ergebnis erhält man ein gemitteltes Schalleistungsspektrum in Abhängigkeit von der Frequenz. In Abbildung 6 ist zum besseren Verständnis der Schalldruck in kPa dargestellt.

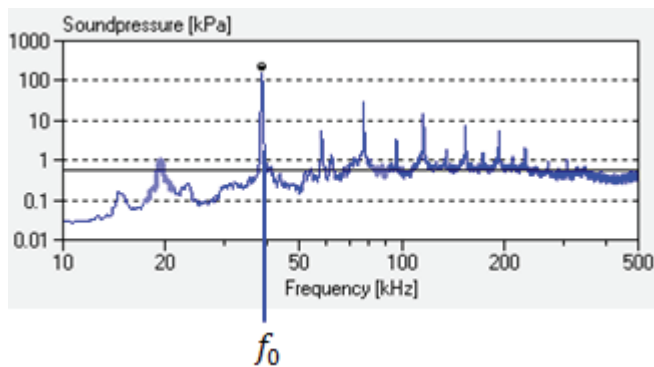


Abbildung 6: Schalldruck im Ultraschallbad in Abhängigkeit von der Frequenz

Hier erkennt man die Arbeitsfrequenz der Ultraschallwandler f_0 , sowie die subharmonischen und harmonischen Schwingungen. Weiterhin finden sich im Spektrum Frequenzen, die von der Geometrie der Wanne beeinflusst werden. Zwischen den harmonischen Frequenzen befindet sich das Kavitationsrauschen. Dieses wird als ein Maß für den Reinigungseffekt angesehen [2]. Es soll nun ein Wert für dieses Rauschen gefunden werden, der möglichst gut mit dem Reinigungseffekt korreliert und der möglichst wenig durch die harmonischen Schwingungen beeinflusst wird.

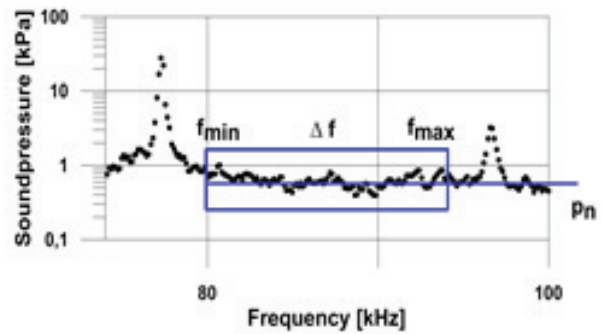


Abbildung 7: Schalldruckverlauf im Frequenzbereich Δf

Im Frequenzbereich von $\Delta f = 2,25 x f_0 \pm 0,1 x f_0$ befinden sich wenige störende Frequenzanteile. Hier wird der Medianwert des Schalldrucks des Kavitationsrauschens gesucht und als Repräsentant des gesamten Rauschens herangezogen (gerechnet wird dabei mit den quadrierten Werten).

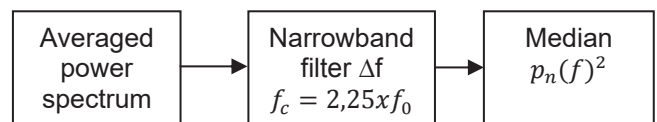


Abbildung 8: Ermittlung der Kavitationsrauschleistung

Dieser so ermittelt Schalldruck wird mit dem Referenzschalldruck in Wasser $p_{ref} = 1 \mu Pa$ verglichen und der Logarithmus davon ermittelt. Der so berechnete Wert in der Größenordnung von 160-180 ist allerdings für Servicetechniker schwer handhabbar, weshalb eine Modifikation vorgenommen wird und der Kavitationsrauschpegel wie folgt berechnet wird.

$$L_{CN} = 10 \log \left(\frac{p_n^2}{p_{ref}^2} \right) - \text{modification}$$

Abbildung 9: Berechnung Kavitationsrauschpegel

Aus praktischen Gründen wird $\text{modification} = 140$ gewählt, alle im Weiteren dargestellte Kavitationsrauschpegel wurden so ermittelt.



Abbildung 10: Beispiel für die Darstellung des Kavitationsrauschpegels in der praktischen Anwendung

Messungen des Kavitationsrauschpegels und deren Interpretation

Misst man den Kavitationsrauschpegel in einem Ultraschallbad und erhöht dabei die Intensität, mit der der Ultraschall erzeugt wird, ergibt sich ein interessantes Verhalten, welches in Abb. 11 dargestellt ist.

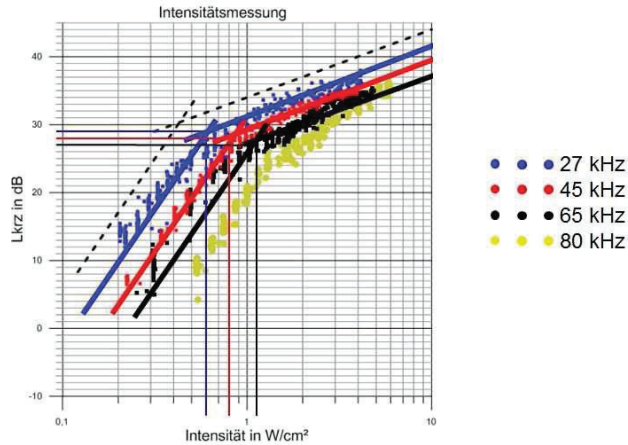


Abbildung 11: Abhängigkeit des Kavitationsrauschpegels von der eingestrahelten Ultraschallintensität und der Arbeitsfrequenz

Bei kleinen Intensitäten steigt der Kavitationsrauschpegel mit einer mehr als doppelt logarithmischen Steigung an, um dann ab einer von der Anregungsfrequenz abhängigen Schwelle in eine einfach logarithmische Steigung überzugehen [3]. Die Erfahrung mit Ultraschallreinigungsgeräten zeigt, dass oberhalb dieser Schwelle effektiv gereinigt werden kann.

Ein weiteres Beispiel zeigt einen Verlauf des Kavitationsrauschpegels über der Zeit bei Verwendung von Deionisiertem- und Stadtwasser.

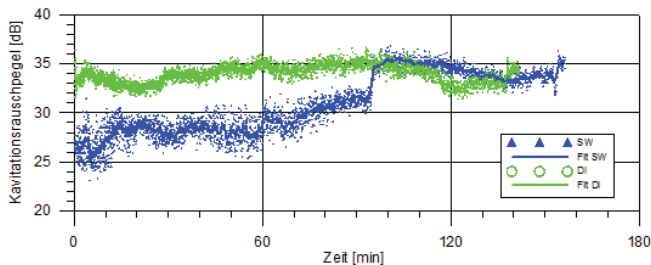


Abbildung 12: Abhängigkeit des Kavitationsrauschpegels von der Zeit und der Flüssigkeit (SW = Stadtwasser, DI = DI-Wasser)

Beim DI-Wasser wird von Anfang an ein Kavitationsrauschpegel von über 30dB gemessen, d.h. ein Wert oberhalb der Schwelle. Beim Stadtwasser verharrt der Pegel ca. 60 Minuten auf einem niedrigen Pegel, um dann ca. weitere 15 Minuten leicht anzusteigen und um dann auf einen Wert zu springen, der dem DI-Wasser entspricht. Dies wird dadurch erklärt, dass im Stadtwasser vorhandene Gasbläschen und Partikel die Kavitation unterdrücken; sie werden aber nach einiger Zeit aufgelöst oder umgewandelt und verlieren ihren Einfluss.

Neben den aufgezeigten Abhängigkeiten gibt es weitere Parameter, die Einfluss auf den Kavitationsrauschpegel haben, wie z.B. Temperatur, Einsatz von Reinigungschemie oder Verschmutzung des Flüssigkeitsmediums.

Die bisher aufgeführten Messungen zeigen die gemessenen Ursprungswerte des Kavitationsrauschpegels. Aufgrund des stochastischen Auftretens der Kavitation weisen diese relativ hohe Schwankungen auf. Setzt man weitere statistische Verfahren ein, erhält man gemittelte Werte mit geringer Standardabweichung [4].

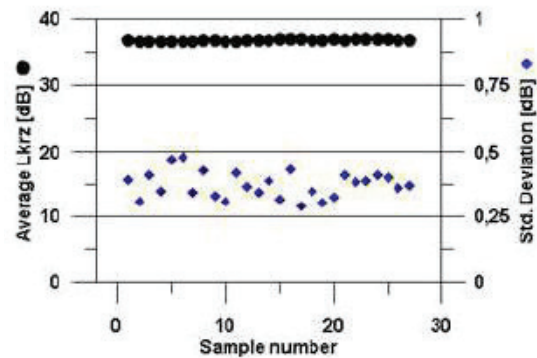


Abbildung 13: Durch den Einsatz von statistischen Methoden ergibt sich eine Standardabweichung des gemittelten Kavitationsrauschpegels von 0,4 dB

Zusammenfassung und Ausblick

In Ultraschallreinigungsgeräten wird in Bädern Kavitation erzeugt, die zur Reinigung der eingebrachten Ware eingesetzt wird. Mit Hilfe des vorgestellten Verfahrens kann ein Kavitationsrauschpegel ermittelt werden, der mit dem Reinigungseffekt korreliert. Anhand von Beispielen werden praktische Anwendungen aufgezeigt.

Wird ein standardisiertes Messverfahren eingesetzt, bei dem alle relevanten Parameter berücksichtigt werden, können damit Neugeräte überprüft und in regelmäßigen Abständen verifiziert werden.

Literatur

- [1] Young, R: Cavitation, McGraw-Hill, 1989, p.116 ff.
- [2] Zwahlen, A. et al.: Comparison of Methods for Testing Ultrasound in the Cleaning Bath, Fortschritte d. Akustik DAGA2014, 716-717
- [3] Hertz-Eichenrode, A. et al.: Verhalten des Rauschpegels bei der Kavitationsschwelle für unterschiedliche Frequenzen, Fortschritte d. Akustik DAGA2014, 698-699
- [4] Hertz-Eichenrode, A. et al.: Experimental Verification of the Distribution Function of the Cavitation Noise, Fortschritte d. Akustik DAGA2016, 97-100