

KaviMeter: Ein Messverfahren zur Bestimmung des Kavitationsrauschens

Reinhard Sobotta und Christoph Jung

Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co. KG, D-Singen

1. Einführung

Zum Reinigen wird häufig ultraschallinduzierte Kavitation benutzt. Die Wirkung transientser Kavitation beruht dabei auf der beim Blasenkollaps erzeugten Strömung und Stoßwelle. Die mechanische Wirkung der Kavitation kann allerdings nicht auf einfache Weise gemessen werden. Daher wurde bereits vorgeschlagen, das beim Kollaps erzeugte Geräusch spektral auszuwerten [1]. Ein typisches Spektrum des Schalldruckpegels ist in Abbildung 1 für ein Ultraschallgerät mit 35 kHz Anregung dargestellt.

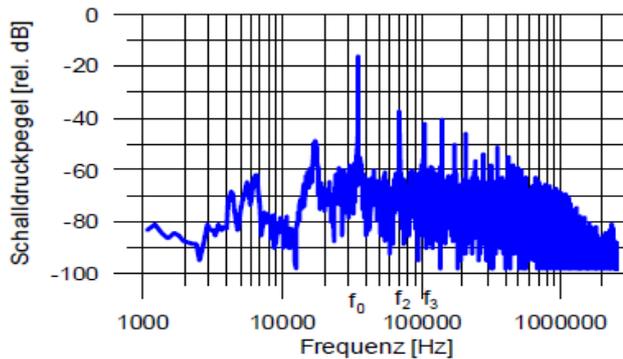


Abb. 1: Typisches Spektrum des Schalldruckpegels bei Anregung mit einer Frequenz von 35 kHz bei transientser Kavitation.

2. Messverfahren im Frequenzbereich

Das von einem Hydrophon aufgenommene Signal wird über einen Tiefpass bzw. ein Antialiasingfilter auf einen AD-Wandler gegeben. Der lineare Frequenzbereich sollte ca. 500 kHz mit einer Dynamik von mindestens 12 Bit umfassen. Sollte ein Deltasigma-Wandler zum Einsatz kommen, kann bei entsprechender Überabtastung eventuell auf den analogen Tiefpass verzichtet werden.

Das digitale Signal wird nun blockweise gespeichert und verarbeitet. Um das Rauschen zwischen den Spektrallinien nach einer FFT messen zu können, ist eine zeitliche Fensterfunktion mit hoher Dämpfung der Nebenmaxima notwendig. Für eine hohe Dynamik bietet sich eine Blackman-Funktion an, während eine zeitlich gleichmäßige Wichtung bei Verwendung der Von-Hann-Funktion (Raised-Cosinus) mit einer Überlappung der Fenster von 50% entsteht. Die darauf folgende FFT sollte mindestens eine Frequenzauflösung von 200 Hz entsprechend einer Länge von mindestens 5 ms haben. Bei einer Abtastrate von 1 MS/s bietet sich z. B. eine Länge von 8192 μ s für die FFT an. Die Frequenzauflösung beträgt in diesem Fall ca. 122 Hz.

Da die spektralen Amplituden des Rauschens stark schwanken, ist es sinnvoll über mehrere Spektren zu mitteln. Um die Rauschleistung richtig zu ermitteln werden die Quadrate der spektralen Amplituden gemittelt und auf die Frequenzauflösung bezogen. Dies entspricht also einem mittleren Leistungsdichtespektrum.

Bei der Ultraschallfrequenz tritt häufig die höchste Amplitude auf. Diese Frequenz f_0 wird nun im Spektrum gesucht. Da die Oberwellen in der Regel bei einem Vielfachen von $f_0/2$ liegen, wurde vorgeschlagen, das Rauschen z. B. zwischen der 2- und 2,5-fachen Oberwelle zu bestimmen. Dies entspricht einem Schmalbandfilter mit der Bandbreite $\Delta f = (2,4 - 2,1) \cdot f_0 = 0,3 \cdot f_0$.

Da immer wieder einzelne Spektrallinien mit hoher Amplitude in diesen Frequenzbereich fallen können, bietet es sich an, den Median der Werte zu berechnen. Der daraus resultierende Messwert ist die Kavitationsrauschzahl KRZ mit der Einheit [Pa/ \sqrt Hz]. Die Intensität des Rauschens I_r in einer ebenen Welle ergibt sich mit einer Bandbreite B des Rauschens und der Impedanz des Mediums Z nach Gleichung 1. Da die Bandbreite des Rauschens und die Impedanz von Wasser ungefähr in der gleichen Größenordnung liegen,

$$I_r = \frac{KRZ^2 \cdot B}{Z} \quad (1)$$

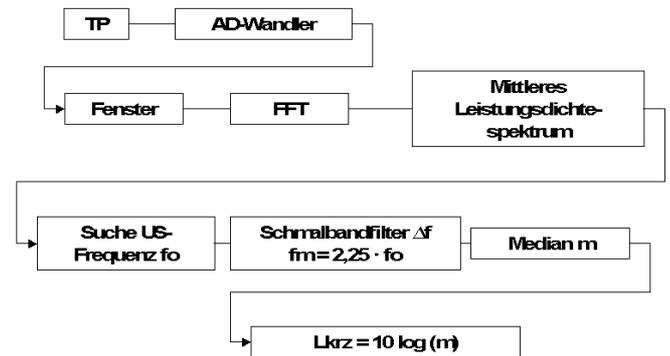


Abb. 2: Blockschaltbild für die Messung des Kavitationsrauschpegels im Frequenzbereich.

Es macht es Sinn, den Rauschpegel aus dem Median zu berechnen und eine Bezugsintensität von 1 W/m^2 zu wählen. In Abbildung 2 ist dieses Messverfahren schematisch dargestellt.

Das Messverfahren wurde auf einem Windows-PC mit einem AD-Wandler implementiert. Es misst über ein kalibriertes Hydrophon außer der Frequenz und dem Rauschpegel auch den Schalldruck der anregenden und der subharmonischen Frequenz sowie den Spitzenwert des Rauschpegels.

Es wurde nun überprüft, wie dieses Messverfahren auf einem digitalen Signalprozessor implementiert werden kann.

3. Messverfahren im Zeitbereich

Das Verfahren basiert auf dem Prinzip der Schmalbandanalyse mit Modulator. Aus dem digitalisierten Signal $x(t)$ wird die Frequenz f_0 des Ultraschalls über eine digitale PLL (PhaseLockedLoop) oder eine FFT gewonnen. Das Signal wird dann mit einer Sinusfunktion der 2,25-fachen Frequenz f_0 multipliziert:

$$y(t) = x(t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 2,25 \cdot f_0 \cdot t) \quad (2)$$

Das Produkt der Winkelfunktionen führt zur Summe und Differenz der Frequenzen. Das Rauschsignal bei einer Frequenz $2,25 \cdot f_0$ liegt nach der Modulation somit bei 0 Hz und kann mittels eines Tiefpasses gefiltert werden. Als Tiefpass wird ein 6-poliges Chebyshev-Filter mit einer Bandbreite von 3 kHz verwendet. Die Einschwingzeit des Filters von ca. 1 ms muss bei der Messung berücksichtigt werden. Danach wird über eine quadratische Mittelung der Effektivwert berechnet. Die Länge der Mittelung sollte 20 ms betragen, damit eine Amplitudenmodulation des Ultraschallsignals berücksichtigt wird. Das Ultraschallsignal ist in der Regel mit der gleichgerichteten Netzfrequenz moduliert und kann auch halbwellenmoduliert sein.

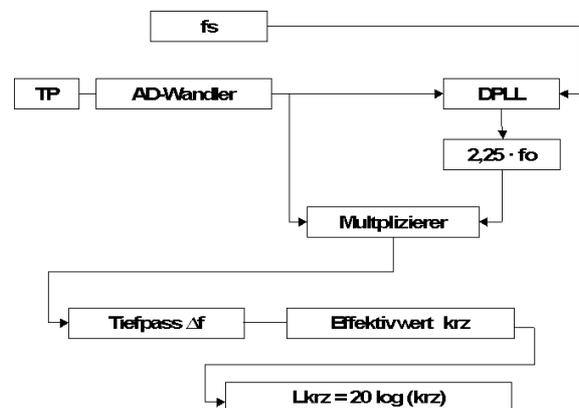


Abb. 3: Blockschaltbild für die Messung des Kavitationsrauschpegels im Zeitbereich

Die Effektivwertberechnung reagiert allerdings empfindlich auf einzelne Frequenzen mit hohen Amplituden innerhalb des Durchlassbereichs des Tiefpasses. Wenn einzelne Spektrallinien, z. B. Oberwellen eines frequenzmodulierten Ultraschallgeräts, in den Frequenzbereich des Tiefpasses fallen würden, ergäbe sich für das Kavitationsrauschen ein falscher Wert. Daher wird vorgeschlagen, das Ausgangssignal des Tiefpasses im Frequenzbereich auszuwerten. Hier kann wie oben beschrieben nach einer FFT der Median im Frequenzbereich des Tiefpasses bestimmt werden. Der Vorteil liegt darin, dass hinter dem Tiefpass nur noch Frequenzen im Bereich 0 bis 3 kHz vorliegen.

Die beiden vorgeschlagenen Verfahren liefern vergleichbare Rauschpegel, die oberhalb der Kavitationsschwelle entsprechend Gleichung 1 proportional zum Logarithmus der eingetragenen Wirkleistung sind $1/l$. Somit existiert ein Messverfahren, mit dem es möglich ist, ultraschallinduzierte Kavitation quantitativ zu beschreiben. Die „Qualität“ der Messwerte ist allerdings von dem akustischen Sensor, dem Hydrophon abhängig.

3. Hydrophone zur Kavitationsmessung

Zur Messung des Schalldrucks wird ein handelsübliches breitbandiges Hydrophon (Reson TC4034) verwendet. Dieses Hydrophon besteht aus einer piezoelektrischen Kugel, die mit Chloroprenkautschuk ummantelt ist (s. Abb. 4). Der Außendurchmesser des Hydrophons beträgt 11 mm.

Außerdem wird ein Edelstahl draht mit einem Durchmesser von 1 mm als Wellenleiter benutzt. Die Spitze des Wellenleiters ist auf einer Länge von ca. 3 mm blank und danach mit einem Kunststoff ummantelt (s. Abb. 4). Hierdurch wird die Übertragungsfunktion breitbandiger und die Kavitation auf der ummantelten Länge vom Edelstahl abgehalten. Am Ende des Wellenleiters wird das Signal von einer Piezokeramik abgenommen.

In einem kleinen Versuchsbecken wird bei $f_0 = 25$ kHz eine kavitierende Blasenstruktur in Form eines „Sterns“ unter der Wasseroberfläche erzeugt. Die Struktur kann mit großer Wiederholgenauigkeit immer am gleichen Ort erzeugt werden. Verwendet wird DI-Wasser mit Netzmittel. Die Blasenstruktur hat in der Draufsicht einen Durchmesser von ca. 30 mm.

Die Hydrophone werden in der Höhe so eingestellt, dass die Spitze jeweils die Blasenstruktur ca. 2 mm durchdringt. Eine Schrittmotorsteuerung bewegt das jeweils montierte Hydrophon horizontal langsam durch die Blasenstruktur. Die Schrittweite beträgt 0,5 mm und wird einmal pro Sekunde durchgeführt. Das Hydrophon wird über eine Strecke von insgesamt 80 mm bewegt.

In Abbildung 5 ist das Reson-Hydrophon neben der Blasenstruktur zu erkennen. Aufgrund der Größe (11 mm Durchmesser) und des hydrophoben Materials (Chloroprenkautschuk) ergibt sich ein großer Einfluss auf die Blasenstruktur. Die Struktur wird zuerst von dem Hydrophon angezogen und bei Erreichen des Strukturzentrums beiseite gedrückt. Während das Hydrophon sich dann wieder aus der Blasenstruktur herausbewegt, kann die Blasenstruktur sich plötzlich um das Hydrophon herumbewegen und sich dabei von dessen Oberfläche lösen. Der Einfluss des bewegten Hydrophons auf die Struktur ist groß und kann nicht vernachlässigt werden.

Der Edelstahlwellenleiter hat aufgrund seines kleineren Durchmes-



Abb. 4: Reson-Hydrophon TC4034 und Edelstahlsonde

ers von 1 mm einen deutlich geringeren Einfluss auf die Blasenstruktur. Der Edelstahl draht kann unmittelbar durch die nahezu konstante Struktur geführt werden und stört die sich bewegenden Blasen und die Strömung kaum.

Während der Bewegung der Hydrophone durch die kavitierende Blasenstruktur wurde der Kavitationsrauschpegel gemessen. In Abbildung 7 ist der Rauschpegel über der Distanz aufgetragen. Der Mittelpunkt der Blasenstruktur ohne Hydrophon liegt bei 40 mm. Das Chloropren-ummantelte Reson-Hydrophon misst bereits außerhalb der Blasenstruktur einen Rauschpegel, der nur 6 dB unter dem Maximum liegt. Innerhalb der Blasenstruktur gibt es keine weitere Ortsauflösung. Mit diesem Hydrophon kann ein Ultraschallgerät nur auf seinen Mittelwert des Rauschpegels hin vermessen werden.

Der Edelstahlwellenleiter misst außerhalb der Blasenstruktur ca. 15 dB weniger als im Maximum. Auch innerhalb der Blasenstruktur ist eine weiter ortsauflösende Messung möglich.

Die Beobachtungen zeigen also, dass Größe und Material der Oberfläche des Hydrophons einen großen Einfluss auf das Messergebnis haben.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist das Kavitationsrauschen zwischen den Spektrallinien zu messen. Das Messverfahren im Frequenzbereich ist besonders für FFT-Analysatoren geeignet, während mit einem DSP die Berechnung im Zeitbereich ideal ist.

Das Hydrophon sollte entsprechend der Anwendung ausgewählt werden. Große Kunststoff- oder Kautschuk-ummüllte Hydrophone eignen sich für eine Messung des räumlich und zeitlich gemittelten Rauschpegels. Für eine ortsauflösende Vermessung von Kavitationsfeldern eignen sich eher kleine Sondenhydrophone mit eher hydrophilen Oberflächen. Ideal wäre ein Hydrophon, welches weder durch geometrische Größe noch durch seine Oberflächeneigenschaften kavitierende Blasenstrukturen beeinflusst.

Um im Rahmen der Normung Messverfahren für transiente Kavitation festlegen zu können, muss der Einfluss des Hydrophons selbst auf die Messung weiter untersucht werden.

Literatur:

/1/ Ch. Jung, R. Sobotta: Fortschr. d. Akustik, DAGA2005, S. 581.

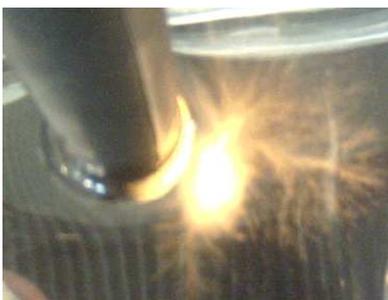


Abb. 5: Reson-Hydrophon verdrängt kavitierende Blasenstruktur.



Abb. 6: Edelstahlwellenleiter im Zentrum einer nahezu unverändert weiter kavitierenden Blasenstruktur.

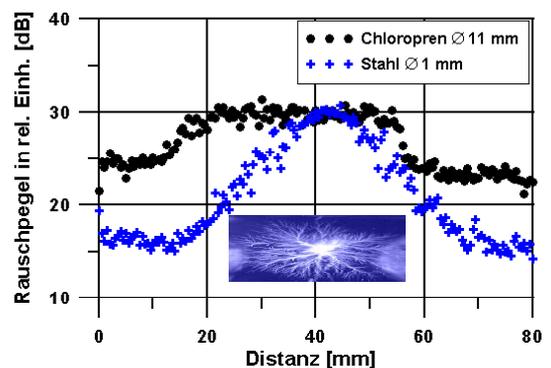


Abb. 7: Messung der Ortsabhängigkeit des Kavitationsrauschpegels mit 2 verschiedenen Hydrophonen.