

Vergleich zwischen spektralen Schallfeldparametern und der Erosionswirkung in kavitierenden Feldern

Klaus-Vitold Jenderka, Christian Koch

Fachbereich „Schall“, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Deutschland,

Email: ultrasonics@ptb.de

Einleitung

Der Leistungsschall ist heute aus den vielfältigen Anwendungen zur Reinigung der unterschiedlichsten Bauteile nicht mehr wegzudenken. Trotz des ständig wachsenden Einsatzes ist der Nutzer auf eine empirische Einstellung und Optimierung der Betriebsparameter angewiesen, da keine allgemeingültigen Kriterien zur Beschreibung der Prozesse existieren. Die messtechnische Erfassung des Schallfeldes als Ursache der Kavitationsvorgänge und damit der gewünschten Wirkung bietet die Möglichkeit zur Beschreibung der ablaufenden Prozesse. Die Problematik besteht dabei in der Wahl geeigneter Sensoren, die einerseits den Kavitationsvorgängen widerstehen können und andererseits klein genug sind um das Schallfeld nicht zu stören. Dabei sollte die Bandbreite so ausgelegt sein, dass sowohl Fundamentalfrequenz als auch Kavitationsrauschen erfasst werden können.

Messaufbau

Die Schallfelduntersuchungen wurden mit einem computer-gesteuerten Messplatz mit 3-Achsen-Scanner zur Positionierung der Sensoren und digitalem Speicheroszilloskop (TDS 3032B) zur Signalaufzeichnung durchgeführt. Als Sensoren dienten piezoelektrische Hydrophone mit zylindrischem aktivem Element (Reson TC 4038 - Ø 4,2 mm, B&K 8103 - Ø 9,5 mm) und optische Faser-Sensoren (verspiegelte Faserspitzen, eingegossen in Polyurethan-Gummi - Ø 4,0 mm bzw. eingebettet in Edelstahlkanüle - Ø 1,0 mm) mit heterodyner Detektion [1]. Zur Aufrechterhaltung konstanter Bedingungen während der je nach abgetasteter Fläche und Schrittweite unterschiedlich lang andauernden Messungen wurden spezielle Maßnahmen getroffen um Temperaturschwankungen zu minimieren, die Frequenz zu stabilisieren, den Wasserstand konstant zu halten und die Wasseroberfläche zu beruhigen. Die eingesetzten Sensoren zeigten sich über eine Vielzahl von Messungen ausreichend stabil und widerstandsfähig gegenüber den Bedingungen im Ultraschallreinigungsbad.

Die Auswertung der für jede Messposition aufgezeichneten Transienten erfolgte mittels MATLAB. Neben den Amplituden der Grundfrequenz wurden die Spitze-Spitze-Amplituden und die Amplituden der ersten Harmonischen, der Sub- und Ultraharmonischen bestimmt. Als weiterer Parameter zur Beschreibung der Kavitation bzw. als Kavitationsanzeiger wurde das über einen festgelegten Frequenzbereich des Spektrums integrierte Amplitudenquadrat des Sensorsignals („broadband integrated energy“ – BIE [2]) genutzt. Die Berechnung dieses Parameters erfolgte jeweils im niedrigen (100 kHz bis 200 kHz) und hohen (1 MHz bis 1,25 MHz) Frequenzband.

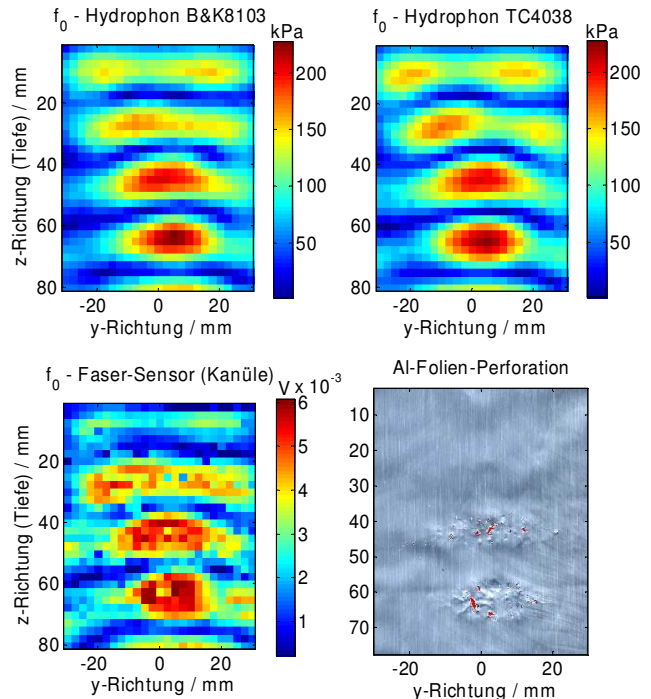


Abbildung 1: Vergleich der eingesetzten Sensoren. Schall-druckverteilung und Wirkung auf eine Aluminiumfolie gemessen in der gleichen Ebene eines Ultraschallreinigungs-bades (TI-H-5, Fa. Elma GmbH).

Um den Zusammenhang zwischen spektralen Schallfeldparametern und der erzielten Reinigungswirkung zu beurteilen, müssen diese in Relation zu der kavitativen Wirkung gesetzt werden. Für eine quantitative Analyse von Prozessen (z. B. Reinigung, Sonochemie) werden in der Praxis viele verschiedene Methoden verwendet, wobei kein Verfahren standardisiert ist [3]. Bei den vorgestellten Untersuchungen kam die Methode der Perforation von Aluminiumfolie zur Anwendung und wurde hinsichtlich der Quantifizierung erweitert [4]. Mit Hilfe von Bildverarbeitungstechniken wurden Perforationen und Einbuchtungen detektiert und als räumliche Dichterverteilung der Erosionswirkung quantifiziert. Damit ist es möglich, spektrale Feldparameter mit der Erosionswirkung in korrespondierenden Ebenen zu korrelieren.

Ergebnisse

In Abbildung 1 sind Beispiele für eine Schallfeldmessung mit verschiedenen Sensoren in der gleichen Ebene einer Reinigungswanne gezeigt. Die gemessene räumliche Verteilung der Druckamplituden bei der Grundfrequenz und die direkte Wirkung auf eine Aluminiumfolie (Scannerbild) zeigen qualitativ eine gute Übereinstimmung. Die erzielten Erosionswirkungen decken sich mit den Bereichen hoher Druckamplituden im Schallfeld. Auf Grund der geringeren

Empfindlichkeit und des vergleichsweise starken Rauschens des Fasersensors (20 dB geringere SNR bei der Grundwelle) sind die Fasersensoren besonders für Anwendungen mit hohen Schallwechseldrücken geeignet.

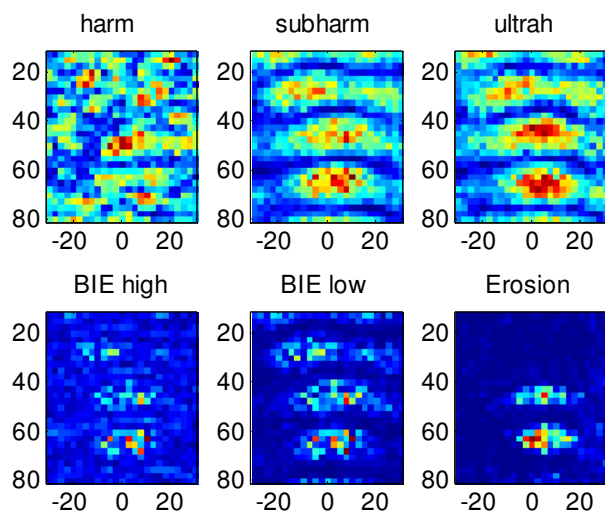


Abbildung 2: Verteilung der spektralen Parameter (Schallfeldmessung mit TC 4038, siehe Abb. 1) und der mit Aluminiumfolie quantifizierten Erosionswirkung (Einbuchtungen und Perforationen, Rastergröße 2,5 x 2,5 mm²).

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten der zweidimensionalen Verteilungen der spektralen Parameter und der Erosionswirkung aus Abb. 1 und 2 (A_f – spektral, A_t – zeitlich gemittelte Amplitude der Grundfrequenz, A_{pp} – Spitze-Spitze-Amplitude des Zeitsignals, harm – erste Harmonische, subh – Subharmonische, uhar – Ultraharmonische, hBIE – hohes und IBIE – niedriges Frequenzband BIE, ErW – Erosionswirkung).

	A_t	A_{pp}	harm	subh	uhar	hBIE	IBIE	ErW
A_f	0.95	0.99	0.28	0.92	0.91	0.39	0.69	0.50
A_t	-	0.94	0.27	0.87	0.86	0.37	0.65	0.46
A_{pp}	-	-	0.34	0.91	0.91	0.40	0.69	0.49
harm	-	-	-	0.28	0.29	0.14	0.24	0.17
subh	-	-	-	-	0.74	0.49	0.84	0.43
uhar	-	-	-	-	-	0.25	0.49	0.45
hBIE	-	-	-	-	-	-	0.82	0.43
IBIE	-	-	-	-	-	-	-	0.42

Um die Schallfeldparameter für eine Prozessbeschreibung nutzen zu können, muss ihre Relevanz für eine Einschätzung der Wirkungen der Kavitation untersucht werden. Dazu wurden die spektralen Schallfeldparameter und die Wirkungen der Kavitation miteinander verglichen (Abb. 2). Die charakteristische Stehwellenstruktur ist sowohl in der Verteilung der Wirkung also auch in der Verteilung der sub- und ultraharmonischen Komponenten und der BIE-Parameter erkennbar. Eine Ausnahme bildet die erste Harmonische, hier ist keine Struktur erkennbar. Eine Korrelationsanalyse unterstreicht diese Aussage (Tab. 1). Die für die gesamte Fläche errechneten Korrelationskoeffizienten bestätigen, dass ein enger Zusammenhang zwischen Grundwelle und

Erosionswirkung besteht. Hohe Korrelationskoeffizienten ergaben sich auch für die Sub- und Ultraharmonischen und mit Einschränkungen für die BIE-Parameter. Da nicht in allen Bereichen mit erhöhten Schalldrücken bzw. spektralen Komponenten eine Wirkung auf die Aluminiumfolie erzielt werden konnte, ergeben sich für die Korrelationskoeffizienten der Erosionswirkung Werte im Bereich von 0,42 bis 0,50. Eine schlechte Korrelation zeigte sich generell für die Verteilung der ersten Harmonischen.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Das Schallfeld in kavitierenden Medien kann sinnvoll gemessen werden und stellt wichtige Informationen für eine Beurteilung praktischer Prozesse zur Verfügung. Sowohl piezoelektrische Hydrophone als auch faseroptische Sensoren können eingesetzt werden, wobei ein Zerstörungsschutz notwendig ist.

Die Grundwelle ist die wichtigste Größe einer Schallfeldmessung und stellt allgemein die wichtigste messtechnische Maßnahme dar. Sie lässt sich stabil mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis und sensorunabhängig bestimmen. Die räumliche Korrelation zu Kavitationswirkungen war stets hoch. Es wurde kein Schwellenverhalten festgestellt. Von hoher Bedeutung sind außerdem die Subharmonische und die das Kavitationsrauschen beschreibenden BIE-Parameter. Sie zeigen ein typisches Schwellenverhalten und konnten als typische Kavitationsanzeiger identifiziert werden. Ihre räumliche Korrelation zu Kavitationswirkungen war ebenfalls hoch. Zwischen den BIE-Parametern für das niedrige und hohe Frequenzband wurde nur in wenigen Fällen ein signifikanter Unterschied gefunden. Für den praktischen Einsatz sind demnach extrem breitbandige Sensoren nicht notwendig.

Das Verfahren der Wirkungsdetektion mit Aluminiumfolie lässt eine räumlich aufgelöste und quantitative Beschreibung zu. Offen ist noch, für welche Prozessanwendungen solche erosiven Methoden sinnvolle Ergebnisse liefern.

Mit den vorgestellten Methoden kann eine räumliche Lokalisierung der Wirkungszonen und damit das Auffinden optimaler Positionen im Reinigungsbad durchgeführt werden. Damit steht ein wichtiges Hilfsmittel zur Optimierung der Schallfeldgeometrie zur Verfügung.

Danksagung

Das Vorhaben (FV-13791) wurde aus Mitteln des BMWI über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert.

Literatur

- [1] Ch. Koch, Appl. Opt. **38** (1999), 2812-2819.
- [2] B. Zeqiri, P. N. Gélât, M. Hodnett, N. D. Lee, IEEE UFFC **50** (2003), 1342-1350.
- [3] IEC:886 Report 886, IEC, 1987.
- [4] K.V. Jenderka, Ch. Koch, Fortschritte der Akustik: Plenarvorträge und Fachbeiträge der 31. Jahrestagung für Akustik DAGA05 (2005), 579-580