

Lokale Konzentration von akustischen Kavitationsanzeigern in technischen Ultraschallfeldern

Christian Koch, Peter Pätzold, Klaus-Vitold Jenderka

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Deutschland, Email: ultrasonics@ptb.de

Einleitung

Die quantitative Beschreibung von Kavitationsfeldern ist für alle praktischen Anwendungen von großer Bedeutung, da insbesondere jede Konstruktion oder Optimierung von Anlagen und Geräten einer objektiven Grundlage bedarf. Während der Bestimmung von Schallfeldparametern in kavitierenden Medien wurde festgestellt [1], dass alle orts aufgelösten Messungen detaillierte Strukturen lieferten. So zeigten die Subharmonischen ebenso Stehwellenstrukturen wie die Grundwelle, obwohl für sie keine Resonanzbedingung erfüllt war. Eine Ursache hierfür könnte sein, dass die Subharmonischen sehr lokal begrenzt erzeugt werden und keine weite Ausbreitung erfolgt. Für eine praktische Interpretation ist es sehr wichtig einschätzen zu können, wie weit die Quelle des Kavitationsereignisses vom Messort entfernt ist, um lokale Aussagen z. B. über die Reinigungswirkung machen zu können. Deshalb wurde mit einer neuentwickelten Technik untersucht, wie stark die lokale Konzentration gemessener Schallfelder bzw. akustischer Kavitationssignale in kavitierenden Medien ist.

Bestimmung eines Lokalparameters

Um den Abstand zwischen Quelle eines akustischen Kavitationssignals und dem Messort zu bestimmen, muss das Signal einer bestimmten, bekannten Blase oder eng begrenzten Blasengruppe erkannt werden. Auf Grund der statistischen Natur der Kavitation gelingt dies nicht mit einer determinierten Zuordnung. Deshalb wurden zur Bestimmung eines Lokalparameters zufällige Signalformen verarbeitet. Dazu wurden in einer Kavitationsblasenwolke zwei Hydrophone vis-a-vis positioniert (Abb. 1). Sie detektieren zwei unterschiedlich Signale, die jedoch ähnliche Anteile enthalten, da die Schallfelder der Blasen auf der senkrechten Symmetrieachse gleiche Signalanteile in den beiden Hydrophonen erzeugen. Da Hydrophone mit ebenen empfindlichen Elementen verwendet wurden (\varnothing 3 mm), selektiert die Richtwirkung zusätzlich entfernte Blasen aus. Stehen die Hydrophone nah beieinander, wird der ähnliche Anteil hoch sein, entfernt man sie voneinander, nimmt er um so schneller ab, je lokaler die Kavitation ist. Definiert man einen Ähnlichkeitsparameter, macht seine Abhängigkeit vom Hydrophonabstand eine Aussage über die lokale Konzentration der Kavitationssignale.

Zur Bestimmung eines solchen Lokalparameters werden die verstärkten Hydrophonsignale zunächst mit einem Digitaloszilloskop gemessen und dann unter Verwendung der beiden Kalibrierungen und einem Entfaltungsalgorithmus in einen Schalldruck umgewandelt (Abb. 1). Danach wird die Ähnlichkeit zwischen beiden mit Hilfe der Kohärenz bestimmt [2]. Man erhält eine frequenz aufgelöste Information, die es

ermöglicht, verschiedene Schallfeldeigenschaften spektral zu selektieren. Ein einzelner Lokalparameter wird durch Integration über einen Spektralbereich erhalten. Dabei wurde die untere Frequenz so gewählt, dass höhere Harmonische der Fundamentalen, die auch von den Wandlern stammen können, sicher ausgeschlossen sind. Die obere Frequenz wurde nicht zu hoch gesetzt, um andere Rauschquellen als die Kavitation ausschließen zu können.

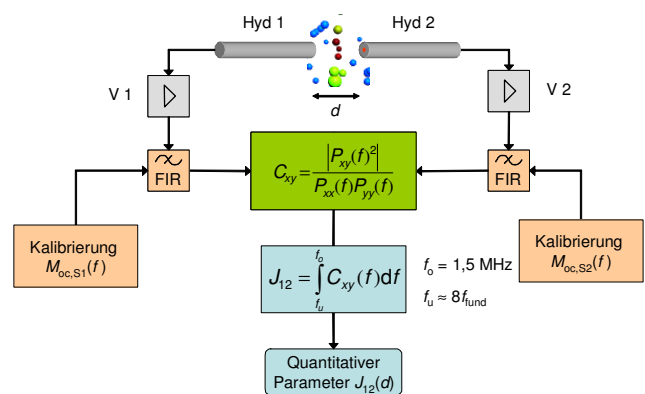


Abbildung 1: Bestimmung des Lokalparameters, Hyd: Hydrophon, V: Verstärker, FIR: nichtrekursives Digitalfilter, C_{xy} : Kohärenz, P_{xx} , P_{yy} : Spektren der Einzelsignale, P_{xy} : Kreuzspektrum, J_{12} : Lokalparameter, f_{fund} : Fundamentalfrequenz.

Experimentelle Realisierung

Die Hydrophone wurden speziell für die Messung angefertigt und verwenden eine PZT-Scheibe (\varnothing 3 mm) mit einer Resonanzfrequenz von 20 MHz als empfindliches Element. Diese Scheibe wurde mit Leitkleber auf einen Stab (\varnothing 3 mm) geklebt der in ein Rohr (\varnothing 8 mm) eingesetzt ist. Die abschirmende Außenelektrode wurde durch einen dünnen Leitkleberüberzug gebildet. Beide Hydrophone wurden mit dem TDS-Verfahren kalibriert.

Alle Messungen wurden in einem Tank (\varnothing 2 m) durchgeführt, der mit Absorbieren ausgekleidet war und so nahezu Freifeldbedingungen sicherte. Ein eingesetzter Kunststoff-sack ermöglichte die Messung mit verschiedenen Wasserqualitäten. Als Quellen wurden eine Sonotrode (\varnothing 6 mm, Bandelin UW 2070, $f_{fund} = 20$ kHz) und eine „inverse“ Reinigungswanne (Anfertigung der Fa. ELMA, $f_{fund} = 39$ kHz) verwendet. Dabei wurden zwei Wandler im Inneren einer Reinigungswanne angebracht, so dass eine Abstrahlung nach außen ins Freifeld möglich war, die Betriebsbedingungen aber denen in einer Wanne entsprachen. Die Anregung erfolgte in beiden Fällen extern mit Hilfe eines Leistungsverstärkers (TA 500). Eine elektrische Messung der Antriebsleistung wurde nicht vorgenommen, sondern die Einstellung des Verstärkers notiert.

Die verstärkten Hydrophonspannungen wurden mit einem Digitaloszilloskop detektiert (TDS 3032 B) und dann mit einem Programm basierend auf Matlab ausgewertet. Bei jeder Abstandseinstellung wurden 8 Einzelmessungen durchgeführt und die ermittelten Parameter gemittelt.

Experimentelle Ergebnisse

Zunächst wurden Messungen mit Hilfe der Sonotrode durchgeführt. Abb. 2 zeigt ein Beispiel für eine Messung bei starker Kavitation. Nur bei geringen Abständen zwischen den Hydrophonen findet man ein Kohärenz von bis zu 0,5 (Maximalwert ist 1). Mit zunehmendem Abstand werden die Werte sehr schnell kleiner. Deutlich wird das vor allem beim integrierten Parameter J_{12} , der einen starken Abfall zeigt (Abb. 3). Hier kann man den absoluten Werten allerdings keine direkte Bedeutung mehr zumessen.

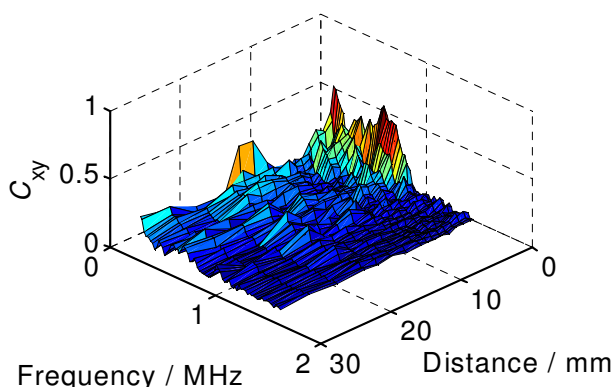


Abbildung 2: Kohärenz für eine Messung mit der Sonotrode in Abhängigkeit vom Abstand der Hydrophone und der Frequenz, gain=5, $f_{\text{fund}} = 20$ kHz, Abstand der Hydrophone von Sonotrode: 40 mm

Zur weiteren quantitativen Analyse wurde die Abhängigkeit des Lokalparameters vom Abstand der Hydrophone mit einer Exponentialfunktion angenähert. Mit Hilfe der Simplex-Suchmethode wurde die Funktion

$$J_{12} = J_0 + A \cdot e^{d/d_0} \quad (1)$$

angepasst. Aus den Anpassungsparametern lassen sich charakteristische Längen d_{ch} definieren, die als Abstand zwischen Quelle und Hydrophon interpretiert werden können. Nimmt man den Abfall von J_{12} auf 1/e des Wertes bei $d = 0$ als Kriterium ist $d_{\text{ch}} = d_0$, bei einem Abfall auf 10% ist $d_{\text{ch}} = -d_0 \cdot \ln 0,1$.

In Abb. 4 ist die Abhängigkeit dieser Parameter von der Anregungsleistung dargestellt. Die Werte fallen mit steigender Verstärkung sehr schnell und verändern sich dann nicht mehr so stark. Zwischen Verstärkungsstufe 2 und 3 setzt auch das charakteristische Kavitationsgeräusch ein woraus sich schlussfolgern lässt, dass mit Einsetzen der inertialen Kavitation sich d_{ch} sehr schnell verringert. Weitere Verstärkung der Kavitation wirkt sich dann nicht mehr so stark aus. Das leichte Ansteigen zu sehr hoher Kavitation hin kann mit einer Konzentration der Kavitationswolke direkt am Wandler begründet werden.

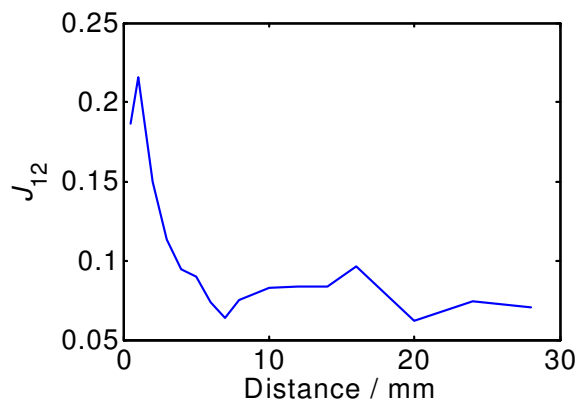


Abbildung 3: Lokalparameter in Abhängigkeit vom Abstand der Hydrophone für eine Messung mit der Sonotrode, Parameter wie in Abb. 2

Schlussfolgerungen

Mit Hilfe der Untersuchung der Korrelationen zwischen unabhängigen Hydrophonsignalen lassen sich Aussagen darüber machen, wie lokal in Kavitationswolken gemessene Schallfeldparameter sind. Es ergeben sich charakteristische Längen im Bereich von 1 bis 3 mm, die zeigen, dass bei starker Kavitation nur Ereignisse eine Rolle spielen, die sich direkt in der Nähe des Sensors abspielen. Bei niedrigeren Kavitationsstufen ergeben sich größere Werte, was zeigt, dass Blasen, die am Sensor anhaften keine entscheidende Rolle spielen. Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass Schallfeldmessungen in kavitierenden Feldern immer eine hohe lokale Spezifität aufweisen und für die Optimierung von Anwendungen sehr nützlich sind.

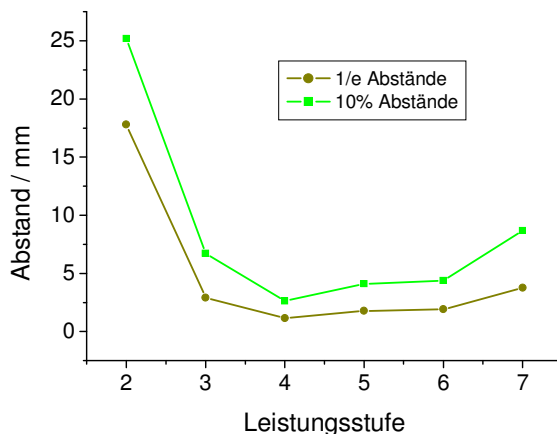


Abbildung 4: Abhängigkeit der charakteristischen Längen von der Anregungsleistung für eine Messung mit der Wanne, $f_{\text{fund}} = 39$ kHz, Abstand der Hydrophone von Sonotrode: 40 mm

Literatur

- [1] Jenderka, K.-V., Koch, Ch. Ultrasonics 44 (2006), e401
- [2] Jenkins, G. M., Watts, D. G.: Spectral analysis and its applications, Holden-Day, San Francisco, 1968