

Einsatz von Beamforming-Algorithmen im Ultraschallbereich zur Lokalisation des Blasenzerfalls

Andreas Look, Daniel Schröder, Oliver Kirschner, Stefan Riedelbauch
 Universität Stuttgart, Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen
 70569 Stuttgart, Deutschland, Email: andreas.look@ihs.uni-stuttgart.de

Einleitung

In hydraulischen Strömungsmaschinen oder auch anderen technischen Anwendungen können Dampfblasen im Fluid entstehen, wenn der lokale Druck im Fluid unterhalb des Verdampfungsdrucks sinkt. Werden die so entstandenen Dampfblasen anschließend in Bereiche höheren Druckes transportiert kommt es zu deren schlagartiger Implosion. Der Prozess der Nukleation, des Wachstums und der Implosion der Dampfblasen wird als Kavitation bezeichnet [1]. Geschieht die Implosion der Dampfblasen in der Nähe fester Oberflächen kann das Material dadurch geschädigt werden. Für eine genaue Bewertung des Aggressionspotentials ist es daher notwendig den Ort des Zerfalls zu bestimmen.

Typischerweise treten in technischen Anwendungen eine Vielzahl verschiedenster Schwingungen überlagert zur Kavitation auf. Um das Kavitationengeräusch möglichst getrennt von übrigen Störgeräuschen zu analysieren, eignen sich Signale im Ultraschallbereich besonders gut. So zeigte SCHMIDT [2], dass bei Auftreten von Kavitation signifikante Veränderungen des Körperschallsignals im Ultraschallbereich zu beobachten sind.

In dieser Arbeit sollen im Folgenden die Ergebnisse erster Grundlagenversuche zur Lokalisation von Kavitation mittels Beamforming in technischen Anwendungen vorgestellt werden.

Messaufbau und Auswertungsmethodik

Hauptbestandteil des Messaufbaus ist ein Kavitationskanal, in welchem ein im Anstellwinkel verstellbarer Tragflügel eingebracht ist. Durch Variation des Druckniveaus ist es entsprechend möglich die Kavitationsintensität zu verändern. Die Beobachtung der Kavitation ist durch eine Seitenwand, welche in Plexiglas ausgeführt ist, hindurch möglich.

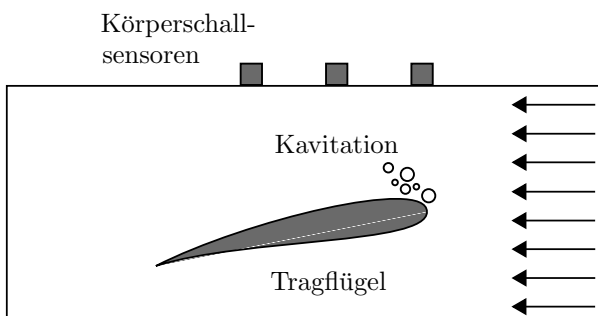


Abbildung 1: Kavitationskanal mit Körperschallsensoren.

Abbildung 1 zeigt eine Prinzipskizze des Messaufbaus. Auf dem ca. 1,5 cm starken, plangefrästen Stahldeckel des Kanals wurden im Verlauf der Versuche verschiedene Anordnungen aus Körperschallsensoren montiert. Dabei wurden Körperschallsensoren mit einem Frequenzbereich von 0,1-1 MHz eingesetzt. Die Anordnungen wurden so platziert, dass sich ca. 3/4 des Körperschall-Arrays hinter der Vorderkante des Tragflügels, bzw. 1/4 des des Körperschall-Arrays vor der Vorderkante des Tragflügels befinden.

Die Auswertung der Messdaten erfolgt in der Software Acoular [3]. Ausgangsbasis für die Berechnung des Schalldruckquadrates am Fokuspunkt f stellt Gleichung 1 dar [4]. Zunächst wird für das Beamforming im Frequenzbereich die Kreuzspektralmatrix C_{mn} berechnet. Dazu wird das Zeitsignal in Blöcke zerteilt und für jeden Block wird die FFT berechnet. Anschließend werden die Kreuzspektren gebildet und zeitlich gemittelt.

$$p^2 = \frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \vec{g}_{fn} C_{mn} \vec{g}_{fm}^* \quad (1)$$

Die Phasen- und Amplitudenkorrektur geschieht durch den komplexen Vektor g_{fn} . Für die Schallgeschwindigkeit wurde eine effektive Schallgeschwindigkeit, welche sich anteilig aus der Schallgeschwindigkeit in Wasser (1484 m/s [5]) und Stahl (für Longitudinalwelle: 5850-5920 m/s, für Transversalwelle: 3230 m/s [6]) zusammensetzt, berechnet. Der mittlere Abstand von einem Körperschallsensor zur Vorderkante des Tragflügels setzt sich zusammen aus einem 7 cm langem Weg in Wasser und einem 1,5 cm langem Weg in Stahl, womit sich eine effektive Schallgeschwindigkeit von ca. 1709 m/s (Longitudinalwellen in Stahl) bzw. 1640 m/s (Transversalwelle in Stahl) berechnen lässt. Für die Auswertung wird eine gerundete Schallgeschwindigkeit von 1700 m/s verwendet. Durch die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten in den beiden Medien kommt es durch das Brechungsgesetz zu einer Richtungsänderung der Wellen am Phasenübergang. Darüber hinaus ergibt sich für jeden Weg zu einem Fokuspunkt von einem Sensor aufgrund der unterschiedlichen Weglängen im Stahl eine andere Schallgeschwindigkeit. Je größer der Abstand von Fokuspunkt zu Sensor wird, desto größer wird der gemachte Fehler. Da die Brechung mit den sich ergebenden Konsequenzen nicht mit einberechnet wird kommt es zu einer Verzerrung der Ergebnisse. Um wie Eingangs erwähnt das Kavitationssignal getrennt von den übrigen Schwingungen zu erfassen, wird eine Mittenfrequenz von 200 kHz gewählt. Wenn nicht anders beschrieben wird für nach-

folgende Auswertungen eine Bandbreite von einer Oktave gewählt. Obwohl der Tragflügel von Wasser umströmt wird, wird das umgebende Medium als ruhend angenommen, da die Strömungsgeschwindigkeit sehr klein in Relation zur Schallgeschwindigkeit ist.

Im nachfolgenden Teil dieser Arbeit soll zunächst der Einfluss des Koppelmediums zwischen Sensor und Stahl geklärt werden. Anschließend wird die Auswirkung verschiedener Bandbreiten auf die Ortungsergebnisse gezeigt. Im letzten Teil der Arbeit werden verschiedene Arrays sowie verschiedene Arraypositionen verglichen.

Einfluss des Koppelmediums

Zweck des Koppelmediums ist es den Luftspalt zwischen Werkstück und Sensor auszufüllen und Unebenheiten des Werkstücks auszugleichen [7]. Untersucht wurden zum einen ein Kleber auf Silikonbasis sowie ein Silikonfett. Das verwendete Array zeigt Abbildung 2.

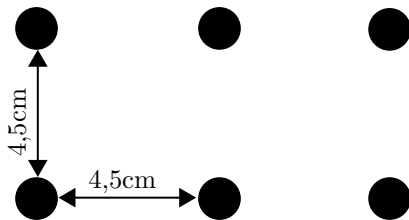


Abbildung 2: Verwendetes Array 1.

Die am Tragflügel auftretende Kavitation zu zwei Zeitpunkten zeigt Abbildung 3. Während der Messung bildete sich ein stationäres Kavitationsgebiet an der Vorderkante an der Plexiglas abgewandten Seite aus. Die Kavitation auf der anderen Seite des Tragflügels zeigte ein instationäres Verhalten und kavitierte nicht durchgängig. In den Ergebnissen ist daher mit stärkeren Quellen auf der der Plexiglas abgewandten Seite zu rechnen.

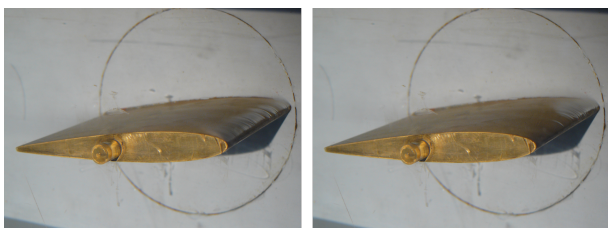


Abbildung 3: Kavitation am Tragflügel zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Abbildung 4 und 5 zeigen die Ergebnisse der Messung bei einer Ansicht von oben bei Verwendung von Fett bzw. Kleber als Koppelmedium. Grau hinterlegt ist in beiden Abbildungen jeweils der Tragflügel eingezeichnet. Die Strömungsrichtung ist von rechts nach links. Die z -Achse ist als Pseudo-Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Schallquellen zu interpretieren und besitzt eine Dynamik von 5 dB. Eine exakte Pegelzuordnung ist aufgrund der nicht verrechneten frequenzabhängigen Intensitätsabschwächungen in Stahl und Wasser nicht möglich, daher wird auf Angabe von Zahlenwerten an der z -Achse

verzichtet. Die eingezeichneten Kreise markieren jeweils die Sensorpositionen.

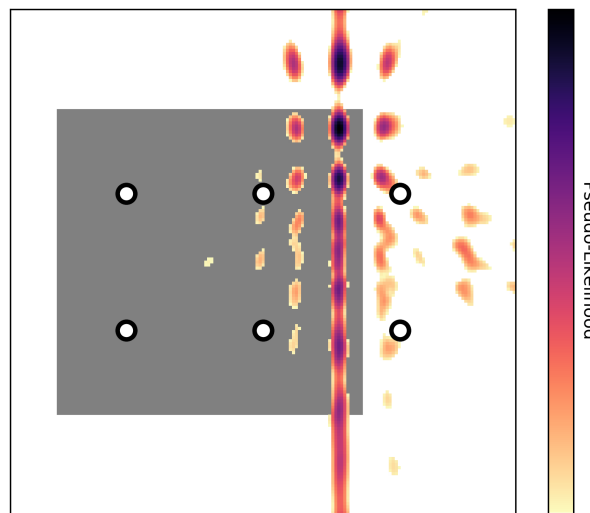


Abbildung 4: Beamforming-Ergebnisse bei Verwendung von Fett.

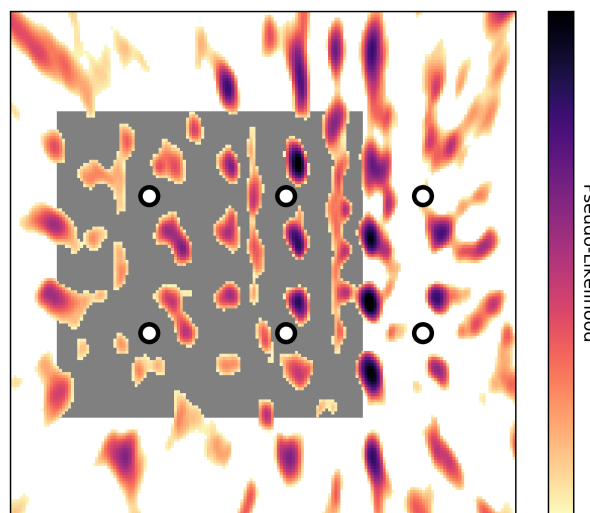


Abbildung 5: Beamforming-Ergebnisse bei Verwendung von Kleber.

Bei Verwendung von Fett ist die Vorderkante des Tragflügels eindeutig als Ort der Schallentstehung und somit als Ort der Kavitation zu identifizieren. Auch besitzen die Quellen auf der Plexiglas abgewandten Seite eine höhere Intensität als auf der gegenüberliegenden Seite, was in Einklang mit Abbildung 3 steht. Im Gegensatz dazu ist bei Kleber als Koppelmedium der Ort der Schallentstehung schwer ausfindig zu machen. Die Schallquellen an der Vorderkante besitzen zwar eine höhere Intensität als die übrigen Quellen, jedoch ist das Bild von hohen Nebenkeulen gezeichnet.

Fett wirkt durch seine im Vergleich geringere Fähigkeit Scherkräfte zu übertragen als eine Art Filter für Transversalwellen und eignet sich somit besser als Koppelmedium. Wird hingegen Kleber verwendet, kommen am Sensor beide Wellenarten an, was zu einer Überlagerung im Signal führt und somit die Ergebnisse verschlech-

tert. BRIGGS [8] hat gezeigt, dass der Energietransport durch Transversalwellen nicht zu vernachlässigen ist, was mit den Ergebnissen dieser Untersuchung korreliert. Für nachfolgende Untersuchungen wird durchgängig Fett als Koppelmedium verwendet.

Einfluss der Bandbreite

Abbildung 6 zeigt die selbe Messung wie Abbildung 4 mit dem Unterschied, dass eine Bandbreite von einer Terz anstatt einer Bandbreite von einer Oktave verwendet wurde. Die Vorderkante ist zwar als dominante Schallquelle ausfindig zu machen, jedoch zeigen sich stärker ausgeprägte Nebenkeulen als bei einer Bandbreite von einer Oktave. Darüber hinaus ist eine regelmäßige Rasterung der Schallquellen zu erkennen, welche bereits in Abbildung 4 zu erahnen war. Diese Rasterung ist durch den unzureichenden Sensorabstand zu erklären. Allgemein ist die Beobachtung, dass bei einer Bandbreite von einer Terz schlechtere Ergebnisse erzielt werden, durchgängig zu machen. Eine Erklärung für diese Beobachtung kann bisher nicht geliefert werden.

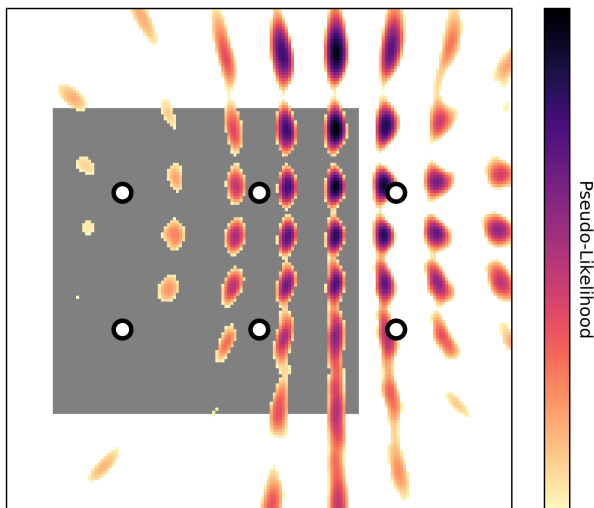


Abbildung 6: Beamforming-Ergebnisse bei einer Bandbreite von einer Terz.

Vergleich verschiedener Arrays

In diesem Abschnitt soll eine weitere Arrayanordnung mit der bisherigen verglichen werden. Die zweite Anordnung der Körperschallsensoren zeigt Abbildung 7.

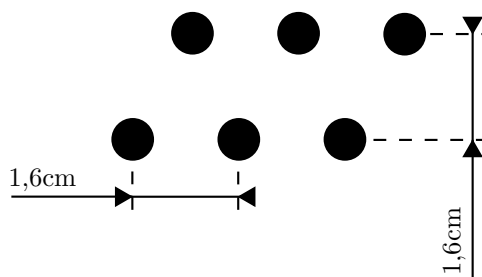


Abbildung 7: Verwendetes Array 2.

Anordnung 1 besitzt im Vergleich zu Anordnung 2 einen

in etwa dreifachen Sensorabstand und eine ca. zwei bis dreifache Gesamtlänge. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Messung bei Verwendung von Array 2. Wieder ist die Vorderkante als Schallquelle zu erkennen. Beide Hälften der Vorderkante zeigen eine ähnliche Schallquellenstärke. Der Bereich der Vorderkante zeigt im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen keine ausgeprägte Rasterung, was auf die höhere Sensordichte zurückzuführen ist. Demgegenüber zeigen die Nebenkeulen eine stärkere Ausprägung, was in Verbindung mit einer zu geringen Gesamtlänge des Arrays gebracht werden kann. Ideal wäre folglich ein Array mit einer ähnlichen Sensordichte wie Anordnung 2 und einer Gesamtlänge wie Anordnung 1 um die Vorteile beider Anordnungen zu nützen.

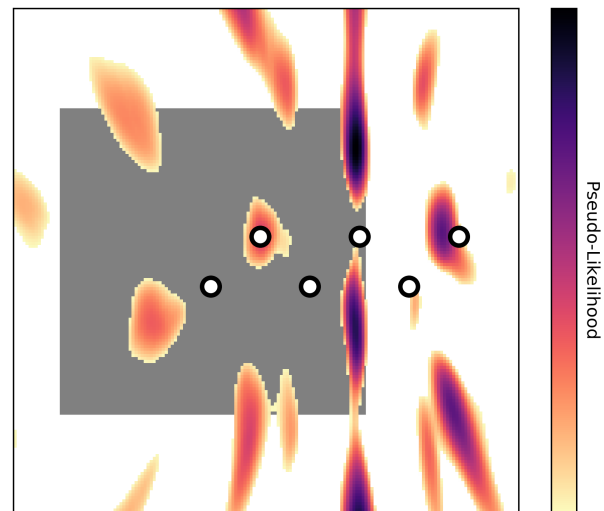


Abbildung 8: Beamforming-Ergebnisse bei Einsatz eines Arrays mit höherer Sensordichte.

Einfluss der Verschiebung

Es soll der Einfluss der Position des Arrays relativ zum Tragflügel untersucht werden. Eine negative Verschiebung entspricht einer Verschiebung in Strömungsrichtung und eine positive entsprechend einer entgegen der Strömung. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigt Abbildung 9. Das Maximum der z -Achse wurde in dieser Untersuchung konstant gehalten. Die Verschiebung 0 cm entspricht der Abbildung 4, welche die Referenz bei den vorherigen Untersuchungen darstellte. Bereits eine Verschiebung um 2 cm kann bei Konstanthaltung des Maximum und der Dynamik an der z -Achse dazu führen, dass keine oder kaum Schallquellen zu identifizieren sind. Bei einer Verschiebung um 3 cm sind vereinzelt Schallquellen zu erkennen, welche jedoch als Rauschen erkennbar sind. Eine Verschiebung in negative Richtung um 1 cm führt dahingegen zu einer Vergrößerung der integralen Schallquellenstärke. Diese Vergrößerung kann durch eine bessere Abdeckung des relevanten Bereichs an der Vorderkante entstehen. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass sich bei Verschiebung des Arrays in Strömungsrichtung die Kavitationszone weg von der Vorderkante bewegt. Dieser Effekt steht in Zusammenhang mit der nicht beachteten Brechung an den Phasengrenzflächen.

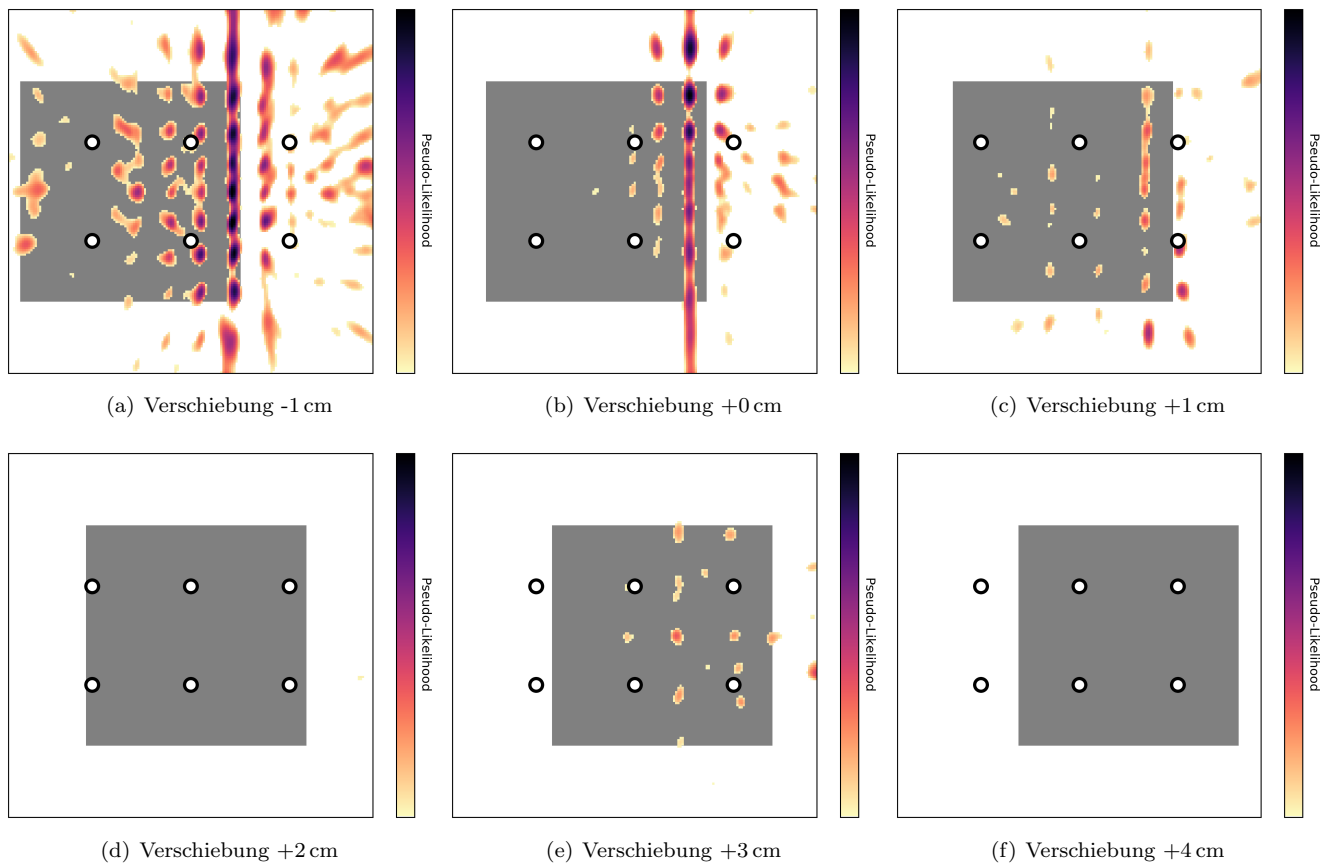


Abbildung 9: Ergebnisse des Beamformings bei Verschiebung des Arrays in 1 cm-Schritten.

Insgesamt lässt sich anhand der Ortungsergebnisse erkennen ob sich eine Kavitationszone zum Zeitpunkt der Messung unter dem Array befand oder nicht.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Ortung von Kavitation durch eine Wand hindurch mittels Beamforming-Algorithmen möglich ist. Für gute Ergebnisse ist es wichtig eine Koppelmedium mit geringer Fähigkeit zur Übertragung von Scherkräften zu verwenden. Darüber hinaus lässt sich mittels des Verfahrens erkennen ob und wo sich ein Kavitationsgebiet zum Zeitpunkt der Messung befand. Zur Verbesserung der Ergebnisse soll im nächsten Schritt der Auswertungsalgorithmus dahingehend erweitert werden, dass der Einfluss der Brechung der Schallwellen an den Phasengrenzflächen ebenfalls beachtet wird. Des Weiteren sollen Arrays mit mehr Elementen getestet werden.

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Voith Hydro Holding GmbH. Wir danken für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung.

Literatur

- [1] Koivula, T.: On Cavitation in Fluid Power, Proc. 1st FPNI-Ph.D.-Symp., Germany, 2000
- [2] Schmidt, H.; Kirschner, O.; Riedelbauch, S.; Necker, J.; Arantes, G.: Cavitation detection in hydraulic turbines, The international Journal on Hydropower and Dams, Bordeaux, France, 2015
- [3] Acoular, URL: <http://www.acoular.org/>
- [4] Sarradj, E.; Herold, G.: Acoular - Open-Source-Software zur Anwendung von Mikrofonarrayverfahren, DAGA, 2016
- [5] Zuckerwar, A.J.: Handbook of the Speed of Sound in Real Gases, Academic Press, 2002
- [6] Rose, J.L.: Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, 2004
- [7] Auerswald, C.: Mikromechanischer Körperschallsensor zur Strukturüberwachung, Dissertation, TU Chemnitz, 2016
- [8] Briggs, A.: Acoustic microscopy-a summary, Reports on Progress in Physics Vol. 55, 1992