

Untersuchung von stehenden Schallfeldern in Flüssigkeit

Marcus Kristen^{1,2}, Annekathrin Döhle^{1,2}, Reinhard Lerch²
Robert Bosch GmbH, Stuttgart¹; Lehrstuhl für Sensorik, Universität Erlangen²;
Email: Marcus.Kristen@de.bosch.com

Einleitung

Ultraschall (US) hoher Intensität wird häufig für industrielle Anwendungen eingesetzt. Beispiele hierfür sind die Reinigung von präzisionsgefertigten Bauteilen oder sonochemische Anwendungen. Die Ultraschallquellen arbeiten dabei im Dauerbetrieb, sodass sich innerhalb des beschallten Mediums ein stehendes Wellenfeld ausbildet. Zur Prozessoptimierung muss das stehende Schallfeld charakterisiert werden können. In diesem Beitrag werden Messergebnisse in Stehwellenfeldern innerhalb von Gefäßen mit rohrförmiger Geometrie vorgestellt.

Experimente und Ergebnisse

Bestimmung der Auslenkungsamplitude von US-Wandlern

Die gemessenen Schalldruckwerte in einem Stehwellenfeld sollen mit Daten aus der Finite-Elemente-Simulation verglichen werden. Dabei muss die Art der Schallanregung in Messung und Simulation übereinstimmen. Hierzu kann z.B. der komplette Aufbau des US-Wandlers simuliert werden, wobei wichtige Parameter für die Modellierung in unserem Fall schwer zugänglich waren (z.B. mechanische Vorspannung des Wandlers, Materialparameter der Backengelemente und Beschaffenheit der Klebeverbindung zur Wand des Gefäßes). Deshalb stellt die Bestimmung der Auslenkungen auf der schallabstrahlenden Fläche eine Alternative zu diesem Vorgehen dar. Mit einem Laservibrometer wird die Geschwindigkeit auf der Wandleroberfläche gemessen und daraus die Auslenkungsamplitude ermittelt. Mit diesem Verfahren kann die Geschwindigkeit der in Luft schwingenden Wandlerfläche bestimmt werden. Für einen in Wasser schwingenden Wandler ist dies nur möglich, wenn die Bereiche hohen und geringen Drucks, welche der Messstrahl passiert, gleich groß sind. In diesem Fall wird das Ergebnis durch das sich vor dem Schwinger ausbildende Schallfeld nicht verfälscht. Eine zweite Möglichkeit ist die Messung der Beschleunigung. Ein auf der schwingenden Fläche aufgeklebter Beschleunigungsaufnehmer misst die Beschleunigung unter Wasser und daraus wird die Auslenkungsamplitude bestimmt. Die auf diese Weise ermittelten Auslenkungsamplituden werden in den im Folgenden dargestellten Simulationsergebnissen als Eingangsgrößen verwendet.

Untersuchungen an einer laufenden Schallwelle

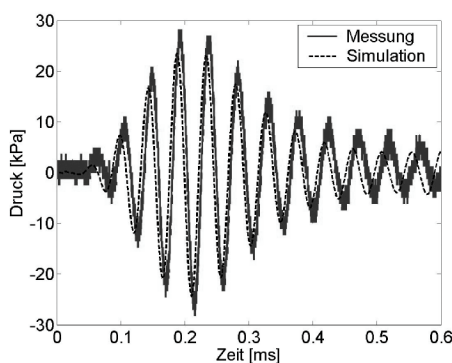


Abbildung 1: Laufende Schallwelle; Schalldruck in einem Abstand von 10cm von der schwingenden Fläche.

Als erstes Beispiel werden Messergebnisse im Schallfeld eines US-Wandlers vorgestellt, wobei noch keine Überlagerung von Wellenzügen auftritt und kein Stehwellenfeld entsteht. Hierzu wird ein gekapselter US-Wandler in einen Messtank (Abmessungen 100*50*50cm³) eingebracht und ein amplitudenmoduliertes, sinusförmiges Spannungssignal (Sinusburst) angelegt. Das abgestrahlte Drucksignal wird mit einem PVDF-Nadelhydrophon in verschiedenen Abständen von der schwingenden Fläche entlang der akustischen Achse aufgezeichnet. Abbildung 1 zeigt einen gemessenen Druckverlauf im Vergleich zum Ergebnis aus der Simulation. Die Übereinstimmung beider Ergebnisse in verschiedenen Entfernungen von der Schallquelle ist gut.

Untersuchungen in Stehwellenfeldern

In wassergefüllten vertikal stehenden Rohren mit kreisförmigem Querschnitt werden Stehwellenfelder aufgebaut, die ein im Rohrboden integrierter US-Wandler erzeugt. Es werden Verbundschwinger, sogenannte $\lambda/2$ -Dickenschwinger, verwendet, wie sie auch in industriellen Anwendungen eingesetzt werden. Mit einem aus drei Linearachsen aufgebauten Messsystem wird ein Keramikhydrophon (Typ 4013, Fa. RESON) im Schallfeld verfahren und die jeweiligen Drucksignale aufgenommen (siehe Abbildung 2).

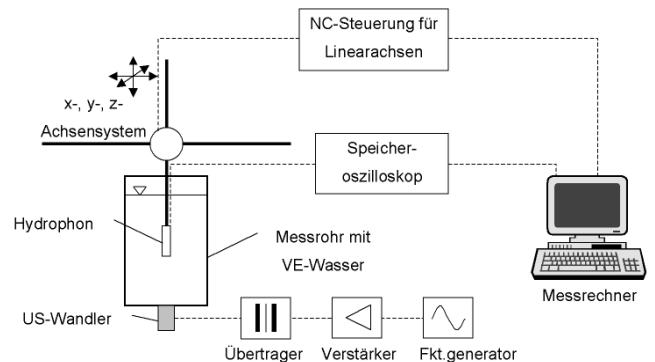


Abbildung 2: Versuchsaufbau für die Untersuchungen in Stehwellenfeldern.

Akustische Resonanzen der Flüssigkeitssäule:

Die akustischen Resonanzen der schwingenden Wassersäule spiegeln sich im Verlauf der elektrischen Impedanz des US-Wandlers wider.

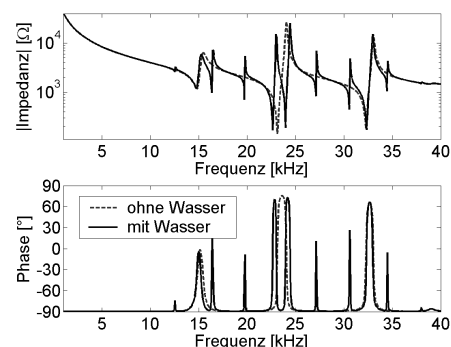


Abbildung 3: Gemessene Impedanz am US-Wandler mit und ohne Wasserlast (Füllhöhe 203mm, Innendurchmesser 20mm)

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer solchen Impedanzmessung des US-Wandlers mit Messrohr mit und ohne Wasserfüllung.

Rohr mit schallharter Berandung:

In einem schallhart berandeten Rohr kann sich unterhalb der ersten Grenzfrequenz nur die ebene Welle in der Flüssigkeitssäule ausbilden. Oberhalb der Frequenz bilden sich höhere Moden (Druck über dem Flüssigkeitsquerschnitt ist nicht mehr konstant) aus, und es tritt eine Überlagerung von mehreren Moden auf. Messungen in der Flüssigkeit sind in diesem Frequenzbereich auf einfache Weise nicht mehr möglich [1]. Deshalb konzentrieren sich die Untersuchungen auf den monomodalen Bereich. Messungen aus der Literatur [2] zeigen, dass aufgrund der mitschwingenden Rohrwand die effektive Schallgeschwindigkeit in dem Flüssigkeitszylinder geringer als im unbegrenzten Medium ist. Die effektive Schallgeschwindigkeit c' in einem Rohr mit federnder Berandung ergibt sich demnach zu:

$$c' = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2K}{E_W} \cdot \frac{(d/r_i + 1)^2 + 1}{(d/r_i + 1)^2 - 1}}} \cdot c_0 \quad \text{eq. 1}$$

c_0 ist dabei die Schallgeschwindigkeit in der allseits unbegrenzten Flüssigkeit, K der Kompressionsmodul der Flüssigkeit, E_W der E-Modul des Wandmaterials, d die Wandstärke des Rohrs und r_i der Rohrrinnenradius. Für das eingesetzte Edelstahlrohr ($r_i=64\text{mm}$, $d=6,5\text{mm}$) ergibt sich damit eine effektive Schallgeschwindigkeit von 1335m/s bei Raumtemperatur. Dieser Wert kann durch eine Schalldruckmessung auf der Rohrachse über die Abstände der Druckmaxima (halbe Wellenlänge) nachgewiesen werden.

Rohr mit schallweicher Berandung:

Das o.g. Rohr wird innen mit einer aufgeschäumten und wasserdichten Verpackungsfolie ausgekleidet, sodass der Innenradius r_i noch 60mm beträgt. Die Folie sorgt für einen annähernd schallweichen Abschluss.

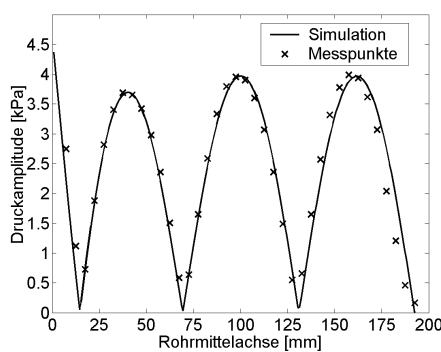


Abbildung 4: Schalldruck entlang der Rohrmittelachse bei einer Anregungsfrequenz von 15,5kHz (Füllstand 192,5mm, Auslenkungsamplitude 3,5mm)

Im Fall der schallweichen Berandung existiert keine ebene ungedämpfte Welle. Unterhalb der ersten Grenzfrequenz ist das Rohr für die Schallübertragung gesperrt. Dies zeigt sich im Experiment und in der Simulation. Die niedrigste untere Grenzfrequenz liegt bei [2]:

$$f_{g1} = \frac{c}{2\pi \cdot r_i} \cdot 2,405 \quad \text{eq. 2}$$

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer Druckmessung auf der Rohrachse oberhalb der Grenzfrequenz und die sehr gute Übereinstimmung mit dem Ergebnis der Finite-Elemente-Simulation. Die Flüssigkeitssäule wird dabei in der Antiresonanz angeregt.

Qualitative Überprüfung der Messmethode:

Mit einem Laservibrometer lässt sich der Druckverlauf in einer ebenen Stehwelle darstellen. In einem mit Wasser gefüllten Glasrohr mit einem Innendurchmesser von 21mm wird eine ebene Stehwelle erzeugt. Das Rohr wird mit einem Laservibrometer durchstrahlt und auf der gegenüberliegenden Seite ein starrer Reflektor angebracht.

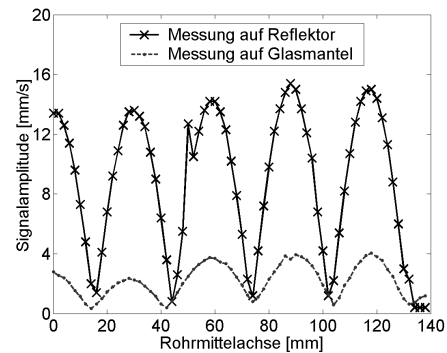


Abbildung 5: Qualitative Überprüfung des Stehwellenfelds in einem Glasrohr bei einer Anregungsfrequenz von 21,5kHz ($c'=1277\text{m/s}$, Füllhöhe 138mm)

Aufgrund der Druckabhängigkeit des Brechungsindex der Flüssigkeit erhält man ein Geschwindigkeitssignal, das die Bereiche hohen und geringen Drucks in der Stehwelle widerspiegelt (siehe Abbildung 5) [3]. Im Fall eines absolut starren Rohrs würde das Ergebnis ausschließlich vom Schallfeld im Rohrrinnen herrühren. In der Realität wird dieser Effekt allerdings von dem mitschwingenden Rohr und dem sich damit ändernden Verhältnis von Wasser- zu Luftstrecke überlagert.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden Messungen in Stehwellenfeldern in Rohren vorgestellt. Für den Fall der schallharten Berandung tritt oberhalb der ersten Grenzfrequenz und bei schallweicher Berandung oberhalb der zweiten Grenzfrequenz eine Überlagerung mehrerer Moden in der Flüssigkeitssäule auf, weshalb eine Messung des Schalldrucks auf einfache Weise nicht mehr möglich ist. Für den Fall der antiresonant schwingenden Flüssigkeitssäule im Rohr lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zeigen. In einem Rohr aus Glas können mit der Laservibrometrie, aufgrund der Druckabhängigkeit des Brechungsindex, die Bereiche hohen und geringen Drucks in einer ebenen Stehwelle nachgewiesen werden.

¹ Kuhl, W.: Die Eigenschaften wassergefüllter Rohre für Widerstands- und Schallgeschwindigkeitsmessungen. *Acustica* (Vol.3), 1953, S. 111-123.
² Günther, B.; Hansen, K.-H.; Veit, I.: *Technische Akustik - Ausgewählte Kapitel*. Expert Verlag, Renningen, 1994.
³ Zipser, L.: Interferometrische Visualisierung von Schallwellen und Turbulenzen. *Technisches Messen*, Band 69 (2002) Heft 6, S. 275-281.