

Modellierung der multimodalen Wellenausbreitung in Ultraschall-Clamp-On-Systemen

Ulrike Hempel¹, Sebastian Wöckel¹, Jörg Auge²

¹ *Institut für Automation und Kommunikation Magdeburg, Werner-Heisenberg-Str. 1, 39106 Magdeburg,
E-Mail: ulrike.hempel@ifak.eu*

² *Hochschule Magdeburg-Stendal, Postfach 3655, 39011 Magdeburg*

Einleitung

Ultraschallsensorsysteme in „Clamp-on“-Technik erfordern geringen Installationsaufwand und sind wegen ihrer nicht medien-berührenden Arbeitsweise ein attraktives Verfahren zur industriellen Prozessüberwachung. Obwohl die gesamte Information über das Messmedium in den transmittierten/reflektierten Wellen liegt, ist die Messung mit Ultraschallwellen jedoch ein indirektes Verfahren, das unter Querempfindlichkeiten gegenüber verschiedenen physikalischen Phänomenen leidet. So treten etwa durch Mehrfachreflexionen oder sekundäre Ausbreitungswege über die Rohrwand unerwünschte (Stör-)Signale auf, die charakteristische Kennwerte des interessierenden Messsignals (z.B. Pulslaufzeit, Amplituden) überlagern und die genaue Erfassung der eigentlichen Prozessgröße erschweren können.

Im Hinblick auf Anforderungen, die sich aus der konkreten prozessanalytischen Aufgabenstellung heraus definieren, erfordert die Steigerung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Clamp-On-Messverfahren daher eine fundierte Signalanalyse sowie ausreichendes Wissen über das Ausbreitungsverhalten der Schallwellen bereits im Vorfeld der Installation/ Messung.

Im Fokus des Beitrags liegt dabei die Ultraschall-Tomografie zur orts aufgelösten Prozesscharakterisierung, die die Applikation mehrerer über den Umfang verteilter Wandler erfordert. Im Beitrag werden daher entsprechende Phänomene der multimodalen Schallausbreitung in flüssigkeitsgefüllten Rohren adressiert. Erste Abschätzungen zu erwarteten Ausbreitungspfaden, Schall-Laufzeiten und Mehrfachreflexionen werden auf Basis der Mason-Theorie durchgeführt. Es werden weiterhin Untersuchungsergebnisse von FEM-Analysen und experimentellen Studien vorgestellt, die dazu beitragen, auch den Einfluss von Modenkonversionseffekten auf das Messsignal abzuschätzen.

Mit Hilfe der genannten Ansätze soll untersucht werden, inwieweit die Veränderung bestimmter Parameter der Impulsantwort entlang einer fest definierten Übertragungsstrecke vorhergesagt oder Zeitfenster im aufgezeichneten Messsignal, in denen keine signifikanten Störeffekte (Mehrfachreflexion, dispersive Schallausbreitung) auftreten, identifiziert werden können. Die Abschätzung des Einflusses störender, oftmals dominierender Anteile im Gesamtsignal soll so erreicht werden.

Modellierung

Die theoretische Abschätzung von Schallausbreitungsvorgängen erfolgt einerseits anhand analytischer, eindimensionaler Beschreibung der akustischen Wellenausbreitung mit Hilfe des Mason-Formalismus für lineare Systeme und andererseits durch Anwendung numerischer Studien (FEM).

Eine lineare Modellierung kann die reale Ausbreitung einer multimodalen Schallwelle in komplexen Strukturen nur annähern. Aufgabe des Modells ist es vielmehr, die wesentlichen Kennwerte des sich ausbreitenden Signals hinreichend analytisch wiederzugeben. Das lineare Modell nach Mason ([1]) wurde im Hinblick auf die Beschreibung der eindimensionalen akustischen Wellenausbreitung in homogenen geschichteten Medien angewendet. Ursprünglich zur Vereinfachung von Signalflussgraphen entwickelt, beschränkt es sich auf die Betrachtung kontinuierlicher Schwingungen. Aufgrund der Linearität lassen sich jedoch auch transiente Vorgänge durch Fourier-Rekonstruktion beschreiben. Der Vorteil dieser Beschreibung liegt in der Möglichkeit, einen analytischen Ausdruck abzuleiten, der sämtliche Mehrfachreflexionen entlang des Ausbreitungsweges beschreibt. Das Modell liefert demnach eine Abschätzung der zeitlichen Folge sämtlicher zu erwartenden direkten und mehrfach reflektierten Signale, anhand derer das optimale Signalfenster gewählt werden kann. Gleichzeitig ergibt sich der Nachteil, dass alle Ausbreitungswege, die nicht vom Modell betrachtet werden, einen zusätzlichen Störfaktor beim Vergleich der analytischen Lösung mit den Messdaten hervorrufen.

Studien zur akustischen Durchschallung an geschichteten Systemen haben jedoch gezeigt, dass die Ausbreitung einer longitudinalen Schallwelle bei mehreren Übergängen zwischen flüssigen und festen Phasen mit einem vernachlässigbaren Fehler berechnet werden kann. Abb. 1 zeigt vergleichend die modellierte Lösung und die Einhüllende des Messsignals auf. Hier wird deutlich, dass die Laufzeit der Longitudinalwelle (nach Durchlaufen des Rohres und Mediums), die Ausbreitung innerhalb der Rohrwand und die ersten Mehrfachreflexionen mit einer Genauigkeit >90% selbst unter vereinfachenden Annahmen (keine Konversionseffekte, Divergenz, Linseneffekte) abgeschätzt werden können. Auf dieser Grundlage kann eine zuverlässige zeitliche Fensterung der relevanten Messsignal-Anteile erfolgen. Geringfügige Laufzeit-Abweichungen zwischen Modell und Messung werden auf thermisch bedingte Drift der Schallgeschwindigkeit und Unebenheiten

der Rohroberfläche zurückgeführt. Die in den Messungen geringer ausfallenden Amplitudenwerte liegen in den im Modell vernachlässigten Sekundäreffekten begründet.

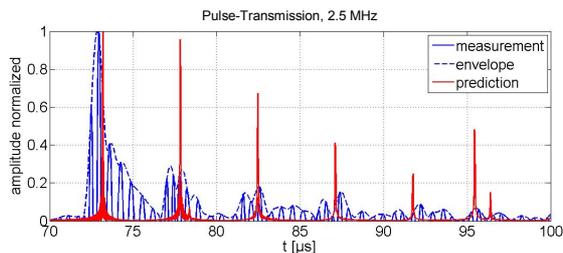


Abbildung 1: Vergleichende Betrachtung modellierter und gemessener (Einhüllende) Durchschallungssignale unter Vernachlässigung sekundärer Effekte (Konversion, Divergenz, Linseneffekte) in einem wassergefüllten Edelstahlrohr (DN 100, Wandstärke 13 mm).

Im Fokus gegenwärtiger Arbeiten steht die Anpassung des Modells an gekrümmte Flächen und parallele Ausbreitungswege und -moden. Modenkonzersionen, z.B. an Fest-Flüssig-Grenzen, lassen sich durch die Verwendung von Tensoren einbeziehen. Die Transmissionsfunktionen und die Reflexionsfaktoren sind dann mehrdimensional entsprechend der Anzahl der zulässigen Moden. Zunächst soll dabei jeder Wellenmode getrennt ohne Modenkonzersion betrachtet werden.

Die Formulierung der Wellengleichung in homogenen, nicht dispersiven Medien in Form von partiellen Differenzialgleichungen stellt die Grundlage des verwendeten Modells finiter Elemente dar. Als Simulationsumgebung wurde Comsol Multiphysics® gewählt. Die Definition der Medieneigenschaften erfolgt unter Annahme der Linearität durch analytische Funktionen. Die Linearität bedingt, dass die Medieneigenschaften unabhängig sind von der Amplitude der eingepprägten Druckwelle. Diese Voraussetzung ist i.d.R. für ultraschallbasierte Messverfahren erfüllt. Die FEM-Studien dienen dazu, das multimodale Schallausbreitungsverhalten in homogenen und mehrphasigen Stoffsystemen in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter zu untersuchen. So konnte anhand einer 2-dimensionalen Simulationsstudie das Verhalten longitudinaler Schallkomponenten in einer Clamp-On-Konfiguration (Kunststoffrohr DN 100, Medienbefüllung: Wasser) im Fall einer Impulsanregung (200 kHz differenzierter Gaußimpuls) abgeschätzt werden. Abb. 2 verdeutlicht anhand der entstehenden transienten Schallwellen, dass sich neben der direkten Welle (a) zusätzliche Komponenten innerhalb des Rohres (c) sowie mehrfache Reflexionen an der Rohrwand (d) und durch Modenkonzersion erzeugte Wellen (b, e) ausbilden. Insbesondere die longitudinale Komponente in

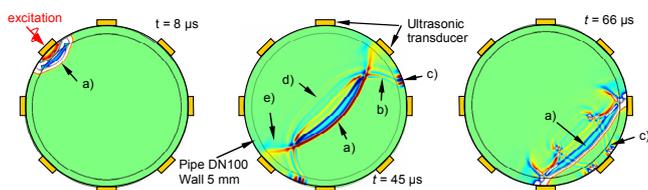


Abbildung 2: Ausbreitung eines 200 kHz-Impulses sowie Entstehung verschiedener Wellenmoden in Medium und Rohrwand.

der Rohrwand (c), die sich entlang der Rohrwand ausbreitet, bewirkt sowohl die Erzeugung einer Körperschallwelle (vorrangig an der schallharten Grenzfläche lokalisiert) und eine modenkonzertierte Welle (b) im Medium selbst. Am Rohrumfang platzierte (virtuelle) Empfänger würden demnach verschiedene komplexe Signalanteile registrieren, deren Charakterisierung, z.B. für Zwecke der Flüssigkeitsanalyse, nicht ohne zusätzliche Sekundärinformationen durchgeführt werden könnte.

Experimentelle Ergebnisse

Vor dem Hintergrund der tomografischen Überwachung eines Prozessvolumens mittels konzentrisch auf dem Rohrumfang verteilter Wandler wurden ergänzend zu den unter Abb. 1 gezeigten Studien messtechnische Untersuchungen zur winkelabhängigen Schallausbreitung an einem leeren und wassergefüllten Rohr (DN 100, Edelstahl, Rohrwandstärke 1.4 mm) durchgeführt. Abb. 3 stellt die Messergebnisse in Abhängigkeit des Winkels zwischen Send- und Empfangswandler (0..180°) bei Impulsanregung dar.

Der Impedanzsprung zwischen Rohrwand und Luft begünstigt die Ausbreitung des Schalls im Festkörper, was anhand der Messwerte der linken oberen Darstellung in Abb. 3 deutlich wird. Demgegenüber wird aber auch bei vollständiger Befüllung des Rohres die Energie der in der Rohrwand umlaufenden Welle durch Abstrahlung ins Medium (Modenkonzersion) nicht vollständig gedämpft (Abb. 3 unten links). Deshalb können in Abhängigkeit des Winkels zwischen den Wandlern offensichtliche Körperschallsignale, die keine medienbezogene Information enthalten, aufgezeichnet werden. Eine spektrale Betrachtung der Messsignale zeigt zudem, dass sich neben der Anregungsfrequenz (2.5 MHz, Abb. 3 mittig) Anteile um 500 kHz (Abb. 3 rechts) ausprägen, was auf die Ausbreitung transversaler oder Lamb-Moden schließen lässt. Gegenwärtige Arbeiten konzentrieren sich daher auf weiterführende Untersuchungen, auch unter Berücksichtigung des Verhältnisses von verwendeter Wandlerfrequenz und Rohrwanddicke.

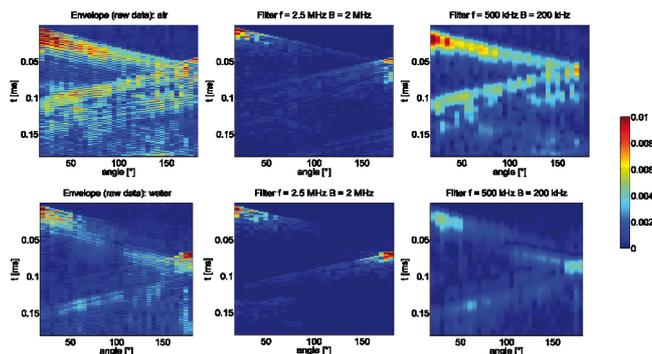


Abbildung 3: Messwerte (links) sowie gefilterte (mittig, rechts) Signale (jeweils Einhüllende, in V) bei Schallausbreitung an leerem (oben) / wassergefülltem (unten) Rohr in Abhängigkeit des Winkels zwischen Send- und Empfangswandler.

Literatur

[1] Mason, S.J.: Feedback Theory - Further Properties of Signal Flow Graphs, Proc. of the Institute of Radio Engineers, vol. 44, number 7 (1956), 920 – 926.