

Ultraschall-Durchflussmessung mit geführten akustischen Wellen: Der Einsatz von Zylindermoden in Rohrsystemen

Alexander Backer¹, Klaus Stefan Drese¹

*¹Institut für Sensor- und Aktortechnik (ISAT), Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg
Am Hofbräuhaus 1b, 96450 Coburg, Deutschland
Alexander.Backer@hs-coburg.de, Klaus.Drese@hs-coburg.de*

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Ansatz zur ultraschallbasierten Durchflussmessung unter Verwendung von Zylindermoden vorgestellt. Im Gegensatz zu etablierten Verfahren wie der diagonalen Durchschallung oder Lambwellen wird hierbei das gesamte Rohr samt Fluid zum Schwingen angeregt, wodurch eine nicht-invasive Messung über die Rohrwand ermöglicht wird. Zur gezielten Sensorauslegung wurde ein Berechnungsansatz entwickelt, der auf der Analyse von Dispersionsdiagrammen mit und ohne Hintergrundströmung basiert. Dadurch lässt sich der zu erwartende Messeffekt aus der Änderung der Phasen- und Gruppengeschwindigkeit bestimmen.

Die Simulationen wurden mit COMSOL Multiphysics unter Berücksichtigung turbulenter Strömungsprofile durchgeführt und dienten der Identifikation eines optimalen Arbeitspunktes, der bei 280 kHz gefunden wurde. Darauf aufbauend wurde ein Sensor mit ringförmig angeordneten Piezokeramiken entwickelt und experimentell an einem Wasserprüfstand validiert.

Die Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der berechneten und experimentell bestimmten Signallaufzeitverschiebungen. Insgesamt demonstriert die Arbeit, dass die Berechnung von Dispersionsdiagrammen mit Hintergrundströmung eine effiziente und zielgerichtete Entwicklung von Ultraschalldurchflusssensoren ermöglicht und großes Potenzial für zukünftige Anwendungen bietet.

Keywords: Nicht-Invasive Durchflussmessung, Ultraschalldurchflussmessung, Geführte Akustische Wellen, Zylindermoden

Einleitung

Der Durchfluss von Flüssigkeiten und Gasen ist in der industriellen Prozessführung, der Herstellung von flüssigen Produkten in der Lebensmittel- und Chemieindustrie sowie dem Vertrieb von z. B. fossilen Energieträgern eine zentrale Messgröße und wird selbst im privaten Haushalt für die Abrechnung des Brauchwassers benötigt [1]. Durch die hohe Anzahl an Einsatzgebieten und den unterschiedlichsten Einsatzbedingungen wurden in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl von Durchflusssensoren, basierend auf unterschiedlichsten physikalischen Prinzipien entwickelt [1]. Neben thermischen, Turbinen- und Coriolis-Sensoren sind vor allem Ultraschallbasierte Durchflusssensoren durch die Möglichkeit einer nicht invasiven Messung weit verbreitet [1]. Neben der klassischen, diagonalen Durchschallung des Fluids gibt es auch Varianten basierend auf Lambwellen [2]. Lambwellen sind geführte akustische Wellen, die unter einem bestimmten Winkel in das Fluid einstrahlen und dadurch eine Durchflussmessung, ähnlich der diagonalen Durchschallung, ermöglichen. In diesem

Beitrag wird eine dritte Variante der Ultraschallbasierten Durchflussmessung unter der Verwendung von Zylindermoden beschrieben. Zylindermoden sind eine Art von geführten akustischen Wellen, die sich entlang von zylindrischen Strukturen, wie es ein flüssigkeitsgefülltes Rohr ist, ausbreiten können [3]. Im Vergleich zu der klassischen, diagonalen Durchschallung bzw. der Einstrahlung der Lambwellen unter einem bestimmten Winkel wird bei dieser Wellenart das gesamte Rohr inklusive Fluid zum Schwingen angeregt und es findet eine axial gerichtete Wellenausbreitung statt. Durch die Ausbreitung der Welle sowohl in der Rohrwand als auch in dem Fluid entsteht eine Sensitivität gegenüber Fluidströmungen, die durch die Interaktion zwischen Fluid und Rohrwand über die Außenseite des Rohres zugänglich ist und für die Durchflussmessung verwendet werden kann. Diese Methode wurde bereits für die Durchflussmessung im Milliliter- und Mikroliter-Bereich eingesetzt und wurde jetzt auf größere Rohrdurchmesser und höhere Flussraten übertragen [4,5,6].

Berechnung des Messeffekts

Für die Entwicklung und Auslegung eines Ultraschalldurchflusssensors ist die Berechnung des zu erwartenden Messeffekts in Abhängigkeit der Rohr- und Fluideigenschaften von entscheidender Bedeutung. Bei der diagonalen Durchschallung bzw. der Verwendung von Lambwellen lässt sich der Messeffekt über den Einstrahlwinkels in das Fluid berechnen. Bei Zylindermoden hingegen existiert dieser Winkel nicht, wodurch ein anderer Ansatz basierend auf Dispersionsdiagrammen verwendet wurde. Der Grundgedanke besteht darin ein Dispersionsdiagramm ohne und mit Rohrströmung zu berechnen und anhand der Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Zylindermoden den zu erwartenden Messeffekt zu berechnen.

Die Berechnung der Dispersionsdiagramme wurde in COMSOL Multiphysics 6.1 mit der von Landskron et al. [7] vorgestellten und auf Zylindermoden übertragenen Methode durchgeführt. Als Physik wurde im Bereich des Rohres Solid Mechanics und im Fluid Linearized Navier-Stokes, Frequency Domain gewählt. Im Vergleich zur Pressure Acoustics ist es so möglich sowohl eine Hintergrundströmung als auch die Aeroacoustic-Structure Boundary als Multiphysikkopplung zwischen Fluid und Rohr zu modellieren.

Die verwendete Rohrgeometrie und Materialeigenschaften sind in Tab. 1 aufgelistet.

Tab. 1: Rohrgeometrie und Materialeigenschaften des COMSOL Modells

Parameter	Wert
Rohr	
Innenradius	7,5 mm
Außenradius	9 mm
E-Modul	193,79 GPa
Poissonzahl	0,294
Dichte	7969 kg/m ³
Fluid	
Schallgeschwindigkeit	1481,4 m/s
Dichte	998,20 kg/m ³
Dynamische Viskosität	1,0093 µPa·s
Volumenviskosität	2,8161 µPa·s
Adiabatexponent	1,0066
Wärmekapazität bei konstantem Druck	4186,9 J/(kg·K)

Als Hintergrundströmung wurde ein über das Modified Power Law beschriebenes, turbulentes Strömungsprofil verwendet [8]. Die

Geschwindigkeitsverteilung im Rohr lässt sich durch Gl. (1) beschreiben. Die Variable m wird als konstant mit dem Wert 2 angenommen und n lässt sich mit Gl. (2) berechnen.

$$v(r) = v_{max} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R_i}\right)^m\right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$n = 0,77 \cdot \ln(Re) - 3,47 \quad (2)$$

Als Reynoldszahl Re wurde 50.000 verwendet, wodurch sich eine maximale Geschwindigkeit v_{max} von 4,0640 m/s ergibt.

Durch die Wellenausbreitung auf einem rotationssymmetrischen System können sich höhere Moden – die sogenannten Azimutalschwingungen – ausbilden, die einer Resonanz entlang des Rohrfangs entsprechen. Welche Moden angeregt werden können und letztendlich angeregt werden hängt hauptsächlich von der Frequenz und dem verwendeten Sensoraufbau ab.

In Abb. 1 ist das berechnete Phasen- und in Abb. 2 das Gruppengeschwindigkeitsdiagramm des mit Wasser gefüllten Edelstahlrohres für die 0-te Azimutalschwingung dargestellt.

Der hierbei farblich visualisierte Messeffekt lässt sich durch die Gl. (3) berechnen.

$$\Delta t_{vph} = \frac{L}{v_{ph+}} - \frac{L}{v_{ph-}} \quad (3)$$

v_{ph+} und v_{ph-} steht hierbei für die Phasengeschwindigkeit der sich ausbreitenden Welle einmal in und einmal entgegen der Strömungsrichtung. In Kombination mit dem Sensorabstand L lässt sich die resultierende Zeitverschiebung, was dem Messeffekt entspricht, berechnen.

In den Abbildungen ist der Messeffekt auf eine Länge von 1 m und eine mittlere Fluidgeschwindigkeit von 1 m/s normiert.

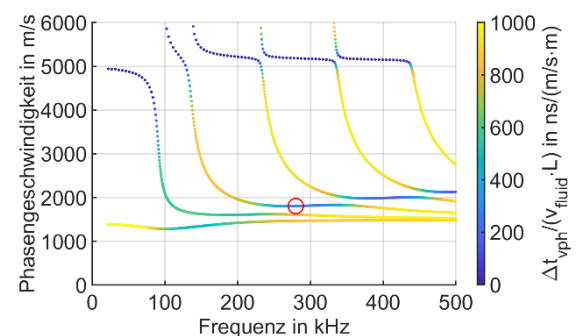


Abb. 1: Phasengeschwindigkeitsdiagramm mit farblich gekennzeichnetem Messeffekt eines mit Wasser gefüllten Rohres. 0-te Azimutalschwingung.

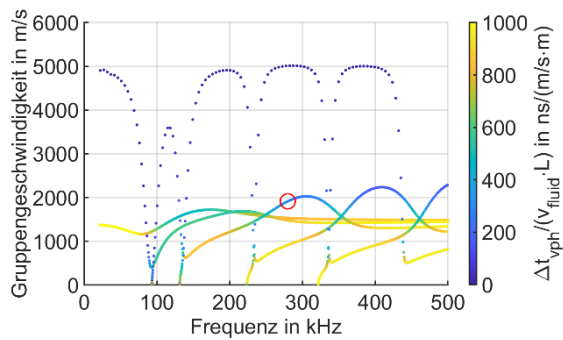


Abb. 2: Gruppengeschwindigkeitsdiagramm mit farblich gekennzeichnetem Messeffekt eines mit Wasser gefüllten Rohres. 0-te Azimutalschwingung.

In Abb. 3 ist der zuvor farblich dargestellt Messeffekt ergänzend als einzelner Graph dargestellt. Die für die Messungen verwendete Mode ist hierbei gestrichelt eingezeichnet und der verwendete Arbeitspunkt ist in den drei Abbildungen mit einem roten Kreis markiert.

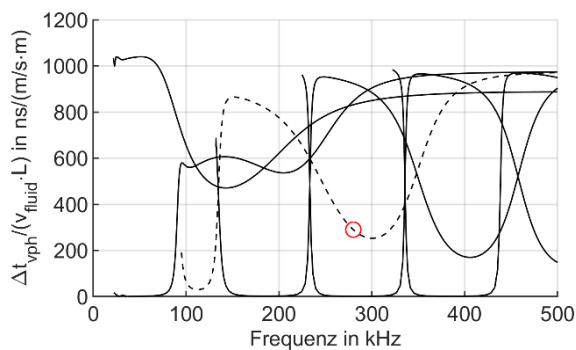


Abb. 3: Berechneter Messeffekt eines mit Wasser durchflossenen Rohres. 0-te Azimutalschwingung.

Obwohl nur die 0-te Azimutalschwingung betrachtet wird, bilden sich in dem simulierten Frequenzbereich eine Vielzahl von Moden aus. Neben den Grundmoden, die bei 0 Hz beginnen, kommen bei steigender Frequenz weitere Moden hinzu, die zu höheren Resonanzen im Fluidraum gehören.

Für die Auswahl eines geeigneten Arbeitspunktes müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Hierzu zählt die Separation von anderen Moden, die durch eine sich deutlich unterscheidende Gruppengeschwindigkeit – siehe Abb. 2 – erreicht werden kann. Zudem muss der Sensor in der Lage sein die angestrebte Mode bei dieser Frequenz anzuregen und die Mode sollte in diesem Bereich auch einen ausreichend hohen Messeffekt – siehe Abb. 3 – aufweisen. Letztendlich müssen diese Faktoren bei der Suche nach einem geeigneten Arbeitspunkt gegeneinander abgewogen werden. Bei dem

hier vorgestellten Sensor hat sich dabei der Arbeitspunkt von 280 kHz ergeben.

Sensoraufbau und Durchflussprüfstand

Für die Anregung der 0-ten Azimutalschwingung und damit einer rotationssymmetrischen Mode bietet sich ein zum Schwingungsverhalten der Mode passender Sensoraufbau an. Der in Abb. 4 und Abb. 5 dargestellte Sensor besteht aus 22 quaderförmigen Piezokeramiken. Die von PI Ceramic GmbH aus dem Material PIC255 hergestellten Piezokeramiken haben eine Kantenlänge von 2,54 mm. Zwischen den Piezokeramiken und dem Rohr befindet sich eine 100 µm dicke Indiumfolie. Diese verformt sich durch das feste Umwickeln und Festspannen der Sensoren mit Zahnseide und gewährleistet eine gute Schallübertragung zwischen den Sensoren und dem Rohr. Die elektrische Kontaktierung erfolgte über das Rohr sowie einem unter der Zahnseide eingewickelten Kupferdraht.

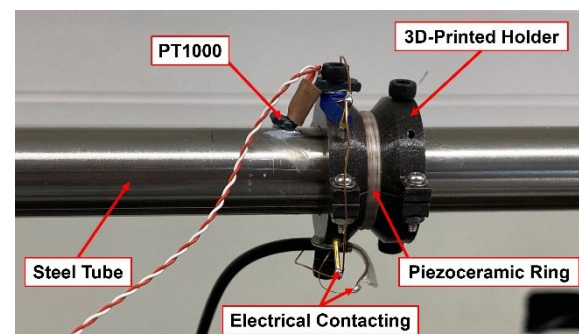


Abb. 4: Eine Seite des Ultraschalldurchflusssensors mit elektronischer Kontaktierung und PT1000 Temperatursensor.

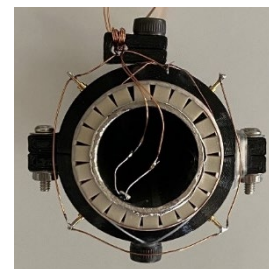


Abb. 5: Querschnitt des an einem Testrohr aufgebauten Ultraschalldurchflusssensors mit 22 Piezokeramiken

Zwei dieser Sensoren wurden an dem 1,6 m langen DN15 Rohr in einem Abstand von 200 mm positioniert. Die Vorlaufstrecke zwischen dem ersten Sensor und der nächstgelegenen Rohrkupplung betrug 1 m. Der so aufgebaute Sensor wurde, in dem in

Abb. 6 dargestellten Wasserprüfstand vermessen. Die Durchflussrate wurde über die Drehzahl einer Kreislumppe gesteuert. Ein Promass Q Coriolissensor der Firma Endress+Hauser diente als Referenzsensor. Die zeitgleiche Anregung erfolgte mit einem Keysight 33500B Funktionsgenerator und die Messdatenaufnahme mit einem LeCroy HDO6054B Oszilloskop. Das Umschalten zwischen Senden und Empfangen wurde durch einen Zweikanal Multiplexer realisiert. Als Anregesignal wurde ein 20 Vpp, 280 kHz, 10-fach Sinus Burst mit Hanning-Fensterung verwendet.

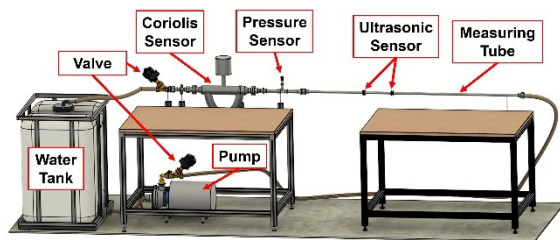


Abb. 6: Durchflussprüfstand

Ergebnisse und Diskussion

Die von beiden Sensoren parallel aufgenommenen Empfangssignale wurden miteinander kreuzkorreliert und die Signalverschiebung bestimmt.

In Abbildung 7 ist oben die gemessene Signalverschiebung inklusive einer linearen Regression durch ein Polynom 2. Ordnung dargestellt. Die Durchflussrate wurde hierbei über die Pumpendrehzahl rampenförmig erhöht.

Der lineare Term spiegelt die Empfindlichkeit der angeregten Mode gegenüber einer Fluidströmung wider. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s ergibt sich bei dem Sensorabstand von 200 mm eine differentiell ausgewertete Signallaufzeitverschiebung von 54,2 ns. Durch Multiplikation mit dem Faktor 5 – Normierung auf 1 m – lässt sich dieser Wert auf den berechneten Messeffekt in Abb. 3 umrechnen. Die sich so ergebende Signallaufzeitverschiebung von 270,8 ns liegt dicht an dem berechneten Wert von 290 ns.

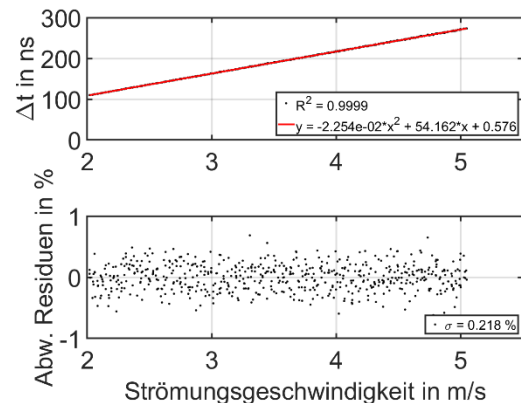


Abb. 7: Durchflussabhängige Signalverschiebung

Für die Abweichungen gibt es eine Vielzahl von möglichen Ursachen. Hierzu zählt die Verwendung von Literaturwerten für die Eigenschaften von Wasser sowie Herstellerangaben bezüglich der Materialeigenschaften und Abmessungen der verwendeten Edelstahlrohre. Zudem ist bekannt, dass der Piezo eine Art Übertragungsfunktion besitzt und es somit Abweichungen zwischen dem Anregesignal und der vom Sensor angeregten geführten akustischen Welle gibt.

Zudem hängt die bestimmte Signallaufzeitverschiebung von dem betrachteten Bereich des Empfangssignals sowie der Auswertemethode ab. Die verwendete Kreuzkorrelation ist wie z. B. auch eine Nullstellenauswertung überwiegend sensitiv auf die Phasengeschwindigkeitsänderung, erfasst jedoch auch zu geringen Teilen die Gruppengeschwindigkeitsänderung.

Wohingegen das Auswerten des Maximums der Einhüllenden empfindlich auf die Gruppengeschwindigkeitsänderung ist. In Abhängigkeit der Auswertemethode ist somit der Messeffekt aus der Änderung der Phasen- bzw. Gruppengeschwindigkeit zu berechnen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Berechnung von Dispersionsdiagrammen mit Hintergrundströmung einen wichtigen Beitrag bei der Entwicklung von Ultraschalldurchflusssensoren basierend auf Zylindermoden liefert und eine gezielte Auslegung und Optimierung ermöglicht. Dies ist besonders durch die hohe Anzahl von Moden sowie dem Auftreten von höheren Azimutalschwingungen, die alle unterschiedlich auf eine Fluidströmung reagieren, hilfreich. Ohne die Berechnung des Messeffekt gäbe es sonst eine quasi nicht zu bewältigende Anzahl an experimentell auf ihre Eignung für die Durchflussmessung zu überprüfenden Moden. Nachdem der Grundstein gelegt wurde, gilt es

im nächsten Schritt das Potential hinter der Verwendung von Zylindermoden für die Durchflussmessung genauer zu untersuchen.

Förderung

Diese Forschungsarbeit wurde vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen des Förderprogramms „Forschung an Fachhochschulen“ unter dem Projekttitel „HydrAmess“ und der Fördernummer 13FH094KX1 gefördert.

Literaturnachweis

- [1] R. C. Baker, *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications*, 2. Aufl. Cambridge University Press, 2015. doi: [10.1017/cbo9781107054141](https://doi.org/10.1017/cbo9781107054141).
- [2] D. A. Kiefer, A. Benkert, und S. J. Rupitsch, „Transit Time of Lamb Wave-Based Ultrasonic Flow Meters and the Effect of Temperature“, *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, Bd. 69, Nr. 10, S. 2975–2983, Sep. 2022, doi: [10.1109/TUFFC.2022.3201106](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2022.3201106).
- [3] J. L. Rose, *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. doi: [10.1017/CBO9781107273610](https://doi.org/10.1017/CBO9781107273610).
- [4] A. Backer, P. Arneth, P. Linke, und K. S. Drese, „NON-INVASIVE ULTRASONIC FLOW MEASUREMENT METHOD FOR THE DETECTION OF FLOW RATES IN THE MICROLITER RANGE“, in *The 5th Conference on MicroFluidic Handling Systems (MFHS 2024)*, Munich, Germany, Feb. 2024, S. 29–32. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.utwente.nl/en/eemcs/mfhs2024/mfhs2024-proceedings.pdf>
- [5] A. Backer und K. S. Drese, „Ultrasonic Flow Measurement Using Guided Acoustic Waves: Application of Cylindrical Modes in Pipe Systems“, in *Proceedings, 2025 ICU PADERBORN, 9th International Congress on Ultrasonics – ICU*, Paderborn: AMA Service GmbH, Sep. 2025, S. 85–88. doi: [10.5162/Ultrasonic2025/A12-b3](https://doi.org/10.5162/Ultrasonic2025/A12-b3).
- [6] M. Takamoto, H. Ishikawa, K. Shimizu, H. Monji, und G. Matsui, „New measurement method for very low liquid flow rates using ultrasound“, *Flow Measurement and Instrumentation*, Bd. 12, Nr. 4, S. 267–273, Aug. 2001, doi: [10.1016/S0955-5986\(01\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(01)00023-1).
- [7] [1] J. Landskron, A. Backer, C. R. Wolf, G. Fischerauer, und K. S. Drese, „FEM-Based Modeling of Guided Acoustic Waves on Free and Fluid-Loaded Plates“, *Applied Sciences*, Bd. 15, Nr. 16, S. 9116, Aug. 2025, doi: [10.3390/app15169116](https://doi.org/10.3390/app15169116).
- [8] A. Salama, „Velocity Profile Representation for Fully Developed Turbulent Flows in Pipes: A Modified Power Law“, *Fluids*, Bd. 6, Nr. 10, S. 369, Okt. 2021, doi: [10.3390/fluids6100369](https://doi.org/10.3390/fluids6100369).