

Nicht-invasives Verfahren zur Messung von Schallgeschwindigkeiten und Schallgeschwindigkeitsprofilen mit Ultraschall

Elfgard Kühnicke, Michael Lenz, Martin Bock, Jörg Sorber

Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik, Institut für Festkörperelektronik, 1062 Dresden, E-Mail: elfgard.kuehnick@tu-dresden.de

Einleitung

Verfahren zur nicht-invasiven Bestimmung der orts aufgelösten Schallgeschwindigkeit sind für die Prozessüberwachung, die Umweltmesstechnik und die Medizin von großem Interesse. Die orts aufgelöste Schallgeschwindigkeit liefert Prozess- und Zustandsparameter, wie z.B. Temperatur, Konzentration und Dichte. Alle bisherigen Verfahren arbeiten mit Wandlern und Reflektoren bei bekannten Abständen, setzen also den Schalllaufweg als bekannt voraus.

Idee

Das Schallfeld hängt sowohl von den Schallkopfparametern als auch von der Schallgeschwindigkeit des Ausbreitungsmediums ab (Abb. 1, 3). Die Idee des neuen Verfahrens beruht darauf, neben der Schalllaufzeit als zweite Messgröße die Fokusslage auszunutzen [1]. Die Fokusposition Fok ergibt sich aus der Schallgeschwindigkeit c und der gemessenen Laufzeit t :

$$Fok_{Med} = c_{Med} \cdot t \quad (1)$$

Der Zusammenhang zwischen Fokuslage und Schallgeschwindigkeit kann für einen Kolbenschwinger analytisch angegeben werden und soll an dieser Stelle zur Verdeutlichung des Verfahrens Verwendung finden. Aus dem Rayleighintegral folgt:

$$Fok = \frac{d^2}{4\lambda} = \frac{d^2}{4c} f \quad (2)$$

wobei d der Element-Durchmesser, λ – die Wellenlänge in dem Ausbreitungsmedium und f – die Frequenz des Schallkopfs sind. Die Fokuslage im Messmedium Fok_{Med} ergibt sich aus der Fokuslage im Kalibriermedium Fok_{Kal} entsprechend Formel (3):

$$\frac{Fok_{Kal}}{Fok_{Med}} = \frac{c_{Med}}{c_{Kal}} \quad (3)$$

Für einen Kolbenschwinger ist der Fokusabstand umgekehrt proportional zur Schallgeschwindigkeit des Ausbreitungsmediums. Damit lässt sich bei bekanntem Fokusabstand im Kalibriermedium aus der Laufzeit gleichzeitig die Schallgeschwindigkeit und der Fokusabstand im unbekanntem Medium bestimmen

$$Fok_{Med}^2 = Fok_{Kal} \cdot c_{Kal} \cdot t \quad c_{Med}^2 = \frac{Fok_{Kal} \cdot c_{Kal}}{t} \quad (4)$$

Messung der mittleren Schallgeschwindigkeit mit einem fokussierenden Schallkopf

Abb. 1 (rechts) zeigt die berechneten Schallfelder [2] eines fokussierenden 8MHz-Schallkopfes in Wasser ($c=1500$ m/s) und in einem Flüssigmetall InGaSn ($c=2740$ m/s). Es wird

deutlich, dass das Aussehen des Schallfeldes und die Fokusslage durch die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden. Geht man von den berechneten Maxima in Abb. 1 aus, so ergibt sich bei Verwendung der angegebenen Schallgeschwindigkeiten in Wasser eine Laufzeit von $15,3 \mu\text{s}$ und in InGaSn von $11,8 \mu\text{s}$ bis zum Fokus.

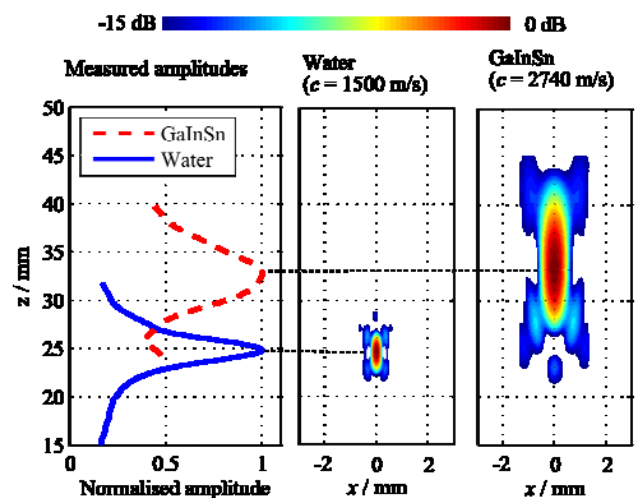


Abbildung 1: Ermittlung der Schallgeschwindigkeit aus der Fokuslage – links: Messung der gemittelten Echoamplitude; rechts: Berechnete Schallfelder in Wasser und InGaSn, Wandler mit einer akustischen Linse aus Keramik ($d=16\text{mm}$, $f=8\text{MHz}$, Linse $r=17\text{mm}$)

Abb. 1 (links) zeigt die aus Messungen stammende gemittelte Echoamplitude. Für die Messungen wurden der Flüssigkeit Streuteilchen zugefügt bzw. vorhandene Streuteilchen (Gasblasen, Partikel) genutzt. Die Echoamplitude wurde durch mehrfache Wiederholung von Impuls-Echo-Messungen an den gleichmäßig bewegten Streuteilchen ermittelt. Da ein Punktrefektor das maximale Echo-signal auf dem Empfänger erzeugt, wenn er sich im Fokus des Schallfeldes befindet, tritt bei gleichverteilten, bewegten Streuern bei einer Mittelung über genügend Messungen das Maximum der aufsummierten Echoamplituden bei der Laufzeit bis zum Fokus auf. Dieser Messwert reicht zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in einer unbekanntem Flüssigkeit aus, wenn zuvor durch eine Kalibrier-messung in einer Flüssigkeit mit bekannter Schallgeschwindigkeit die Schalllaufzeit bis zum Fokus und damit die Fokuslage im Kalibriermedium ermittelt wurde.

Abb. 1 beweist auch, dass bei Bestimmung der Fokusposition (aus der Laufzeit und der Schallgeschwindigkeit) das Maximum der Echosignalkurve die Fokusposition liefert.

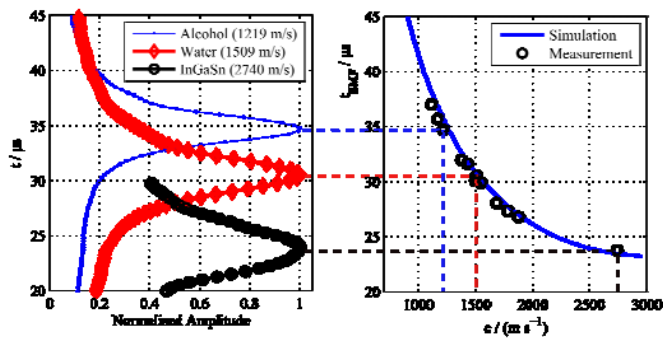


Abbildung 2: Bestimmung der Schallgeschwindigkeit bis zum Fokusort aus der gemessenen Echosignal-Laufzeit; links: gemessene Echosignalkurven für Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen und für die InGaSn-Mischung bei Raumtemperatur (t – doppelte Signallaufzeit)

Abb.2 rechts zeigt die Kalibrierkurve für den fokussierenden Wandler. Dazu wurde das Schallfeld bei verschiedenen Schallgeschwindigkeiten entsprechend Abb.1 (rechts) berechnet, das Maximum bestimmt und daraus unter Verwendung der jeweiligen Schallgeschwindigkeit die Laufzeit bis zum Fokus ermittelt (durchgezogene Linie). Es ergibt sich eine Kalibrierkurve für diesen Schallkopf aus der allein aus der Laufzeit die zugehörige Schallgeschwindigkeit beim Schnittpunkt mit der Kurve bestimmt werden kann. Aus den Laufzeiten für das Maximum der Echosignalkurven lassen sich auch experimentell Kalibrierkurven ermitteln (Punkte in Abb.2).

Mit dem fokussierenden Schallkopf wurden genauere Messungen in Wasser im Thermostaten mit Temperaturen zwischen $T=6^{\circ}\text{C}$ und 60°C ($c=1431\dots1551\text{ m/s}$) durchgeführt. Es ergab sich eine statistische Abweichung der Messdaten von der Kalibriergeraden von $\sigma(c)=1,41\text{ m/s}$. Die zugehörige relative Ungenauigkeit ist damit kleiner als $0,1\%$.

Messung der ortsaufgelösten Schallgeschwindigkeit mit einem Array durch Variation des Fokusabstandes

Durch eine schrittweise Verschiebung des Fokuspunktes bei Verwendung eines Arrays ist es möglich, nichtinvasiv und ohne Verwendung von Vergleichsreflektoren Schallgeschwindigkeitsprofile in einem Medium zu messen. Hierzu werden erste Untersuchungen vorgestellt.

Fokussierung Fok durch zeitverzögerte Ansteuerung der einzelnen Arrayelemente z.B. $Fok=32,5\text{ cm}$ oder $Fok=40\text{ cm}$ ist ein bestimmtes Ansteuerregime, bei dem im Kalibriermedium Wasser ($c=1500\text{ m/s}$) der jeweils angegebene Fokusabstand erzeugt wird. Der Fokusabstand hängt auch in diesem Fall von der Schallgeschwindigkeit des Untersuchungsmediums ab, ist aber über die elektronische Ansteuerung bzw. über den Fokusabstand im Kalibriermedium definiert.

Abb.3 zeigt die Schallfelder für ein Array bei verschiedenen Fokussierungen und in Medien mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten. Schallfeldberechnungen liefern für jede Schallgeschwindigkeit eine Kurve, die die Abhängigkeit der Laufzeit von dem verwendeten Fokussierungsregime dar-

stellt (Abb.4). Bei einem unbekanntem Medium lässt sich aus der Kurvenschar die Schallgeschwindigkeit entsprechend der gemessenen Laufzeit und der eingestellten elektronischen Fokussierung ablesen.

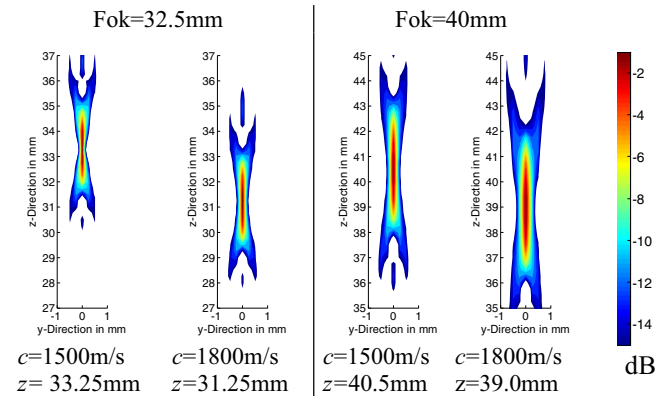


Abbildung 3: Berechnete Schallfelder für gekrümmtes 10MHz-Annular-Array in Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit des Ausbreitungsmediums und der Fokussierung Fok

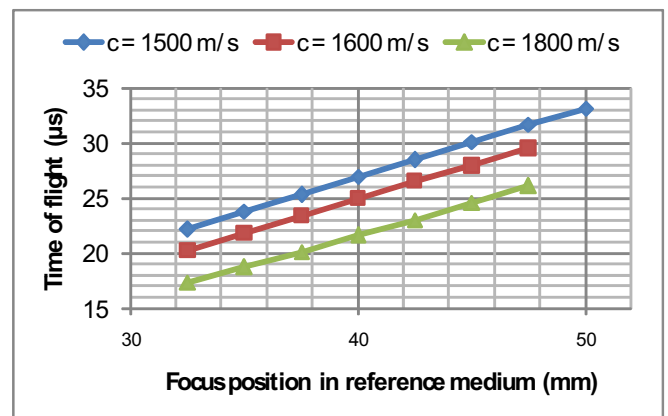


Abbildung 4: Abhängigkeit der Echosignallaufzeit von der Fokussierung bei Medien mit unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit – aus Berechnungen für das gekrümmte Annular-Array erzeugte Kurvenschar

Zusammenfassung

Das vorgestellte neuartige nicht-invasive Verfahren ermöglicht die Messung der ortsaufgelösten Schallgeschwindigkeit in Medien mit Streuern. Das Echosignal der Rückwand oder eines eingebrachten Vergleichsreflektors in einem bestimmten Abstand wird nicht benötigt.

Literatur

- [1] Kühnicke, E., Lenz, M.: Anordnung und Verfahren zur kombinierten Bestimmung von Schallgeschwindigkeiten und Abständen in flüssigen und festen Medien mittels Ultraschall. Patent – Nr. 10 2009 025 464.1-52
- [2] Kühnicke, E. Elastische Wellen in geschichteten Festkörpersystemen: Modellierungen mit Hilfe von Integraltransformationmethoden; Simulationsrechnungen für Ultraschallanwendungen, Schriftenreihe der TIMUG Technologie in Medizin und Gesundheitswesen e.V., Bonn 2001, ISBN 3-934244-01-7.