

Schallfeldbasierte Ultraschallmessverfahren zur gleichzeitigen Messung von Schallgeschwindigkeiten und Abständen

Mario Wolf¹, Elfgard Kühnicke¹

¹ TU Dresden - Institut für Festkörperelektronik, 01069 Dresden, E-Mail: Mario.Wolf@tu-dresden.de

Einleitung

Bei konventionell Anwendung der Impuls-Echomethode werden Laufzeiten gemessen. Bei der Bildgebung wird die Schallgeschwindigkeit im Untersuchungsobjekt als bekannt vorausgesetzt. Die registrierte Echoamplitude wird laufzeitproportional zur Anzeige gebracht, und somit wird der Abstand des Reflektors entsprechend der Laufzeit als Bildpunkt dargestellt. Bei der Materialcharakterisierung wird eine Platte bekannter Dicke verwendet und aus der gemessenen Laufzeit die Schallgeschwindigkeit ermittelt. Für die Messung von ortsabhängigen Schallgeschwindigkeiten werden Reflektoren mit bekannten Abständen zum Ultraschallkopf in des Medium eingebracht oder um das Messvolumen platziert.

Dieser Beitrag gibt eine Übersicht zu neuen schallfeldbasierten Messverfahren, die durch Auswertung der Ultraschallsignale von Streuteilchen oder von bereits im Untersuchungsobjekt vorhandenen Grenzflächen die gleichzeitige Bestimmung von Abständen und Schallgeschwindigkeiten erlauben, ohne dass zusätzliche Reflektoren an bekannten Positionen ins Objekt eingebracht werden müssen. Durch Auswertung der Echosignale von bewegten Streuteilchen in Fluiden und durch die Auswertung der Echosignale ruhender Streuteilchen in Gewebsphantomen kann die Schallgeschwindigkeit orts aufgelöst bestimmt werden. Durch Auswertung der Echosignale von Grenzflächen werden gleichzeitig Schichtdicken und Schallgeschwindigkeiten der einzelnen Schichten einer Schichtstruktur bestimmt [1]. Für diese Verfahren werden ebene und gekrümmte Annular-Arrays als Schallköpfe eingesetzt. Zur Optimierung der Schallköpfe, zur Verfahrensentwicklung, zur Auswertung und für Betrachtungen zur erreichbaren Genauigkeit sind Schallfeldberechnungen erforderlich. Da die Messverfahren in anderen Veröffentlichungen bereits ausführlich dokumentiert sind, soll hier insbesondere darauf eingegangen werden, wie die Schallfeldmodellierungen für eine Genauigkeitsbetrachtung genutzt werden können.

Schallfeldberechnungen

Da für die Verfahren mit Annular-Arrays senkrecht in die Untersuchungsobjekte eingeschallt wird, liegen achsensymmetrische Probleme vor. Es wurde ein Algorithmus zur Berechnung des transienten Schallfeldes für Ringquellen entwickelt [2]. Eine Ringquelle ist eine Verteilung der Quellpunkte, z.B. Normalpunktkräfte, entlang eines Ringes und stellt wie eine Linienkraft [3, 4] ein 2D-Problem dar.

Durch die Summation über die Felder von Ringquellen wird das Feld für die einzelnen Ringelemente des Arrays berechnet. Abbildung 1 zeigt die transienten Felder für die Elemente 1, 2 und 6 für das ein Annular-Array

(Mittenfrequenz 3 MHz, Ringe gleicher Fläche $A = 19 \text{ mm}^2$) in einer Flüssigkeit mit einer Schallgeschwindigkeit von $c = 1500 \text{ m/s}$ (Wasser bei $T = 23^\circ\text{C}$).

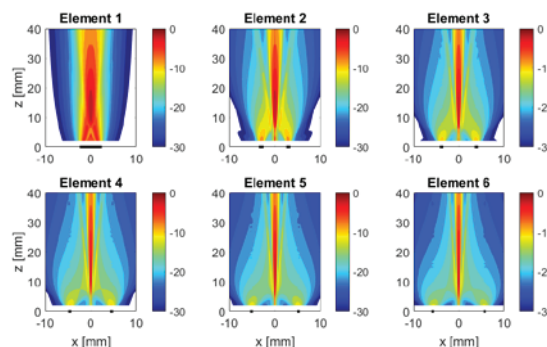


Abbildung 1: Schallfeld mit der maximalen Signalamplitude für die Elemente eines Annular-Arrays aus 6 Ringen gleicher Fläche, Außenradius = 6 mm, keine Zwischenräume, Mittenfrequenz = 3 MHz.

Bei der synthetischen Fokussierung werden die berechneten Schallfelder der Einzelemente entsprechend der gewünschten Fokusposition überlagert. Die Verzögerungszeiten werden geometrisch berechnet:

$$t_{ij} = \frac{\sqrt{[y_{E,i} + y_{E,j}]^2 + [2z_{Fok} - z_{E,i} - y_{E,j}]^2}}{c} \quad [\text{s}] \quad (1)$$

wobei y_E und z_E die Koordinaten der Anheftungspunkt am Sender i und dem Empfänger j darstellen.

Durch die Überlagerung der Einzelemente gekrümmten Sparse-Annular-Arrays (Krümmungsradius 50mm, Mittenfrequenz 10 MHz, Elementfläche soll folgende Messsituation diskutiert werden: Ein Reflektor befindet sich in einem Medium mit der Schallgeschwindigkeit $c = 1500 \text{ m/s}$ im Abstand 35 mm. Will man auf den Reflektor fokussieren und berechnet die Verzögerungszeiten für $c = 1500 \text{ m/s}$ mit Formel (1) für $z = 35 \text{ mm}$, so ergibt sich im überlagerten Schallfeld der Fokus an der gewünschten Position (Abbildung 2 links). Stimmt die zur Fokussierung verwendete Schallgeschwindigkeit nicht mit der tatsächlichen überein und man fokussiert wieder auf $z = 35 \text{ mm}$, so ergeben sich bei der Überlagerung andere Fokusorte im Medium (siehe Abbildung 2 rechts). Der Vergleich der Schallfelder zeigt, dass das von einem Reflektor an einer bestimmten Position (z. B. bei 35 mm) registrierte Signal von der verwendeten Schallgeschwindigkeit zur Berechnung des Fokussierungsregimes abhängt. Die Bilder demonstrieren, dass die Verwendung einer abweichenden Schallgeschwindigkeit bei Fokussierung mit Array-Technik dazu führen kann, dass ein kleiner Reflektor überhaupt nicht gefunden oder nur mit schlechter Auflösung registriert wird.

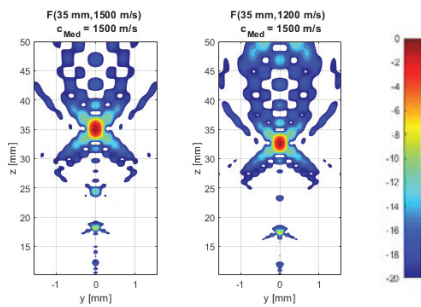


Abbildung 2: Berechnete Schallfelder (normierte Schalldruckamplitude) für die Fokussierung in eine Tiefe von 35 mm, für unterschiedliche Fokussierungsregime: Links: $c_{\text{Med}} = c_{\text{Fok}} = 1500 \text{ m/s}$, Fokus ist an der angestrebten Position; Rechts: Nutzung des Fokussierungsregimes für $c_{\text{Fok}} = 1200 \text{ m/s}$, im gleichen Medium $c_{\text{Med}} = 1500 \text{ m/s}$, Fokus ist zu nah am Wandler.

Klassische Schallgeschwindigkeitsmessung

Die Schallfeldmodellierungen können auch zur Bestimmung der durch die Welleneigenschaften des Schalls auftretenden Messabweichungen eingesetzt werden. Hier erfolgt beispielhaft die Einschätzung der erreichbaren Genauigkeit von (konventionellen) Schallgeschwindigkeitsbestimmungen (in Abhängigkeit der Position des Reflektors im Schallfeld. Dazu wurden die reflektierten Signale eines Reflektors mit einer Geometrie entsprechend Abbildung 3 berechnet. Bei dieser Anordnung wird innerhalb einer Messung das reflektierte Signal von der Deckfläche des Stäbchens und von der Plattenoberfläche registriert und mithilfe einer Kreuzkorrelation der Laufzeitunterschied bestimmt. Da die Höhe des Stäbchens bekannt ist, kann aus der Laufzeit direkt die Schallgeschwindigkeit des umgebenden Mediums ermittelt werden. Im Gegensatz zur Messung, bei der der Reflektor aus Stahl besteht, wurde in den Simulationen eine schallharte Grenzfläche angenommen.

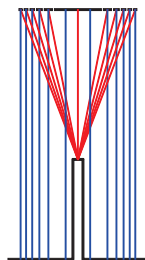


Abbildung 3: Versuchsaufbau für konventionelle Schallgeschwindigkeitsmessungen mit definiertem Abstand zwischen Stäbchenoberfläche und Rückwand.

Für eine Untersuchung des Messverfahrens wurde der Abstand zwischen dem Ultraschallarray und dem Reflektor variiert. Abbildung 4 zeigt die aus der Laufzeitdifferenz und der Stäbchenhöhe bestimmte Schallgeschwindigkeit als Funktion des Abstandes zwischen Wandler und Reflektor. Offensichtlich schwanken die Ergebnisse stark und liegen auch im Mittel nicht bei dem für die Simulation genutzten Wert von $c = 1500 \text{ m/s}$. Damit ergibt sich eine Messunsicherheit für das verwendete Array bei der Schallgeschwindigkeitsbestimmung in einem Medium mit einer Schallgeschwindigkeit von 1500 m/s um $0,5\%$. Daher

muss allein aufgrund der Versuchsgeometrie mit einer Messunsicherheit $> 0,5\%$ gerechnet werden.

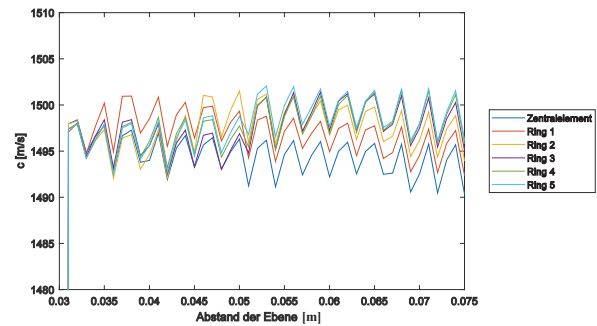


Abbildung 4: Messunsicherheit bei konventioneller Schallgeschwindigkeitsbestimmung entsprechend Abb. 4.

Zusätzlich zu dieser schallfeldbedingten Messunsicherheit kommen noch die Messunsicherheiten durch die Zeitmessung und durch Unsicherheiten der Probenmaße und Ungenauigkeiten bei der Justage zustande.

Ortsaufgelöste Messung der Schallgeschwindigkeit in Fluiden

Zur ortsaufgelösten Schallgeschwindigkeitsbestimmung in Fluiden mit Streupartikeln wurde ein Verfahren entwickelt [5, 6]. Dieses nutzt aus, dass sich die Streuteilchen bewegen und somit im zeitlichen Mittel eine Gleichverteilung der Streuer vorliegt. Somit haben Reflexionen von Streuern im Fokus die größte Amplitude. Mittelt man über die Einhüllenden der Echosignale erhält man eine Kurve, bei der die Position des Maximums der Laufzeit bis zum Fokus entspricht. Mit Hilfe der Schallfeldberechnungen wurden Kalibrierkurven für die verwendeten Arrays erstellt, die die Laufzeit bis zum Fokus als Funktion der Schallgeschwindigkeit des Ausbreitungsmediums und des verwendeten Fokussierungsregimes angeben. Bei den Messungen wird elektronisch fokussiert. Durch Verschiebung des Fokuspunktes entlang der akustischen Achse des Wandlers und Bestimmung der jeweiligen Laufzeit bis zur Fokusposition, lässt sich das Geschwindigkeitsprofil stückweise rekonstruieren. Die erreichbare Messunsicherheit bei diesem Verfahren ist kleiner $1,5\%$ [6].

Temperaturmessung im Gewebe

Bei Hyperthermiebehandlungen ist eine ortsaufgelöste Temperaturüberwachung für eine erfolgreiche Krebstherapie notwendig. In [7] wird ein neues schallfeldbasiertes Verfahren zur ortsaufgelösten Temperaturüberwachung vorgestellt, das es erlaubt, nicht nur relative Temperaturänderungen zu erfassen, sondern eine konkrete Zuordnung einer Temperatur zu einem Messpunkt durchzuführen. Um reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten, wurde ein Gewebe-Phantom (Gel mit Grünalgen als Streupartikeln) entwickelt.

Bei diesem Verfahren werden die Signale ruhender Streuteilchen genutzt. Die mit einem Annular-Array aufgenommenen Signale werden synthetisch fokussiert und die Signalenergie bei Variation des Fokussierungsregimes ausgewertet. Dazu wird mit jedem Element einzeln gesendet und die reflektierten Signale auf allen Elementen einzeln

aufgenommen und abgespeichert, sodass diese nachträglich variabel überlagert werden können.

Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt des reflektierten Signals, bestehend aus dem Echo von der Geloberfläche und Streusignalen aus dem Gel-Inneren, beim Senden und Empfang mit dem Zentralelement. Im Folgenden wird wieder davon ausgegangen, dass das bei Fokussierung auf die entsprechende Streuerposition das Echo-Signal von diesem Streuer maximal wird. Für die aufgenommenen Signale heißt dies, dass bei korrekter Fokussierung alle Signalanteile maximal konstruktiv interferieren müssen. Wie bereits diskutiert wurde, ist dies der Fall, wenn die zur Berechnung der Verzögerungszeiten genutzte Schallgeschwindigkeit gleich der tatsächlichen Schallgeschwindigkeit im Medium ist. Um die Streusignale trennen und einzelnen Positionen zuordnen zu können, wird jeweils die Überlagerung der Signale in einem Zeitfenster durchgeführt. Abbildung 6 zeigt die ermittelte Signalenergie als Funktion der Schallgeschwindigkeit in einem Zeitfenster. Die Position des Maximums entspricht der mittleren Schallgeschwindigkeit zwischen Wandler und Reflektor. Durch schrittweises Verschieben des Fensters durch das aufgenommene Signal wird die mittlere Schallgeschwindigkeit zwischen dem Wandler und Streuern in unterschiedlicher Messtiefen bestimmt.

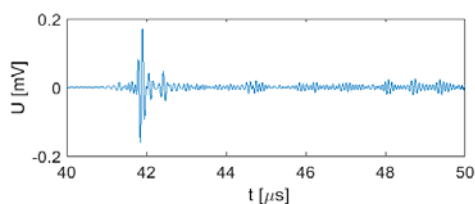


Abbildung 5: Aufgenommenes Echosignal für Senden und Empfang mit dem Zentralelement mit Oberflächenecho vom Phantom und Streuteilchenechos.

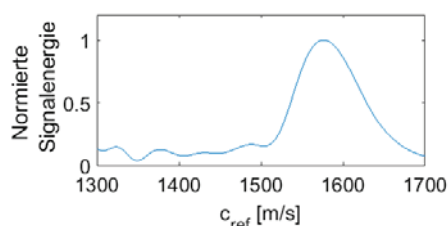


Abbildung 6: Auswertung der Energie des fokussierten Signals im Zeitfenster in Abhängigkeit von der zur Fokussierung verwendeten Schallgeschwindigkeit.

Um einen Temperaturgradienten zu erzeugen wird das Gel-Phantom auf der Oberseite mit einem Heizelement versehen, während an der Unterseite ständig gekühlt wird. Mit Einschalten der Heizung bildet sich ein Temperaturgradient aus.

Zur Feststellung der Genauigkeit des Verfahrens wurden Messungen im Thermostaten bei konstanter Temperatur durchgeführt. Diese ergaben eine Messunsicherheit von ca. 2%.

Mithilfe von Schallfeldsimulationen wurde der Fall nachgebildet, das bei unbekanntem Abstand und unbekannter Schallgeschwindigkeit nur die Laufzeit bis zum Reflektor bekannt ist. Um zusätzliche Informationen zu gewinnen

werden die Fokussierungsregime systematisch variiert und deren Einfluss auf das reflektierte Signal betrachtet. Dabei werden die Verzögerungszeiten wie folgt berechnet: es wird eine beliebige Schallgeschwindigkeit gewählt, aus dieser wird entsprechend der vorliegenden Laufzeit die zu dieser Schallgeschwindigkeit gehörende Reflektorlage ermittelt und die Verzögerungszeiten mit Gleichung (1) berechnet.

Die Schallfelder der Einzelelemente werden entsprechend zeitverzögert überlagert und die Energie bzw. die Amplitude des resultierenden Signals bestimmt. Dieser Vorgang wird für weitere angenommene Schallgeschwindigkeiten wiederholt und die berechneten Schallfelder der Einzelelemente entsprechend überlagert. Abbildung 7 zeigt die resultierende Signalamplitude für einen Reflektor bei $z = 40$ mm in einem Medium mit der Schallgeschwindigkeit $c = 1500$ m/s als Funktion der zur Fokussierung verwendeten Schallgeschwindigkeit. Das Maximum der Kurve tritt auf, wenn die zur Fokussierung verwendete und die tatsächliche Schallgeschwindigkeit des Mediums übereinstimmen.

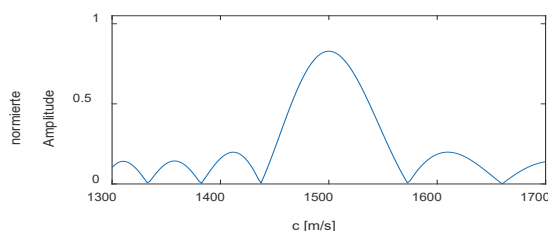


Abbildung 7: Aus Schallfeldsimulationen gewonnene normierte Signalenergie als Funktion der Fokussierung verwendeten Schallgeschwindigkeit.

Da sich die Signale für jede Reflektortiefe berechnen lassen, lassen sich diese Kurven auch für beliebige Tiefen ableiten. Abbildung 8 zeigt farbcodiert die Signalamplitude als Funktion der zur Fokussierung genutzten Schallgeschwindigkeit und der Messtiefe.

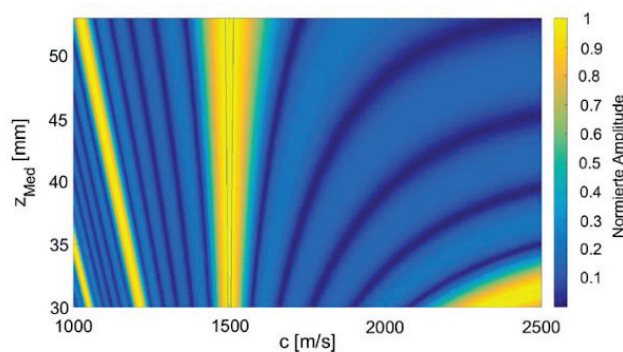


Abbildung 8: Normierter Schalldruck an der Streuerposition z_{Med} in Abhängigkeit von der gewählten Schallgeschwindigkeit c_{Fok} ; die schwarzen Linien markieren den Bereich, bei dem der Schalldruck auf 99% des Maximums abgesunken ist.

Anhand der technischen Parameter des genutzten Messsystems lässt sich aus dieser Kurve die Messunsicherheit tiefenabhängig bestimmen. Für das in [8] genutzte Messsystem liegt diese bei 40 dB. Somit können Werte, die größer als 99% des Maximums sind (siehe Abbildung 8), nicht mehr zweifelsfrei unterschieden werden. Abbildung 9 zeigt die tiefenabhängige, absolute Messunsicherheit.

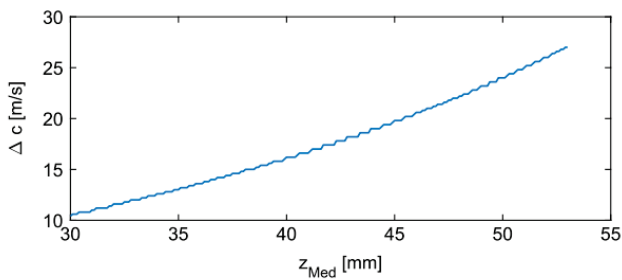


Abbildung 9: Resultierende Unsicherheit in der Schallgeschwindigkeitsbestimmung bei $c_{\text{Med}} = 1500$ m/s.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde anhand schallfeldbasierter Messverfahren gezeigt, wie Schallfeldsimulationen genutzt werden können, um die Leistungsfähigkeit von Messverfahren, insbesondere deren erreichbare Messunsicherheit, zu analysieren. Da sich die Unsicherheiten exakt voraussagen lassen, können die Simulationen genutzt werden, um Parameter bei der Auswertung zu variieren und den Einfluss auf die Messunsicherheit zu bestimmen. So können beispielsweise verbesserte Fokussierungsregime getestet werden, oder für zukünftige Messungen neue Arrays konzipiert werden.

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Projekte: KU 1075/17-1, KU 1075/18-1, KU 1075/14-2.

Literatur

- [1] Wolf, M., Kümritz, S., Kühnicke, E.: A wave propagation model for simultaneous determination of thickness and sound velocity of layered structures. *Journal of Nondestructive Testing* 21 (2016) 7, S. 622.
- [2] Wolf, M., Kühnicke, E.: Transiente Green'sche Funktionen bei ringförmiger Anregung zur verbesserten Modellierung für die Entwicklung neuer Ultraschallmessverfahren. URL: www.daga2017.de
- [3] Pao, Yih-Hsing, Gajewski, R.R.: The generalized ray theory and transient responses of layered elastic solids. In: *Physical acoustics*. Academic Press, 1977. S. 183-265.
- [4] Ochmann, Martin. "Exact solution for the acoustical impulse response of a line source above an absorbing plane." *The Journal of the Acoustical Society of America* 144.3 (2018): 1539-1549.
- [5] Lenz, M. et al.: Measurement of the sound velocity in fluids using the echo signals from scattering particles. *Ultrasonics* 52.1 (2012): S. 117-124.
- [6] Wolf, M., Kühnicke, E.: Noninvasive monitoring of temperature distribution in liquids with ultrasound by locally resolved measurement of sound velocity. *Sensordevices 2014*. Lissabon, Portugal, Proceedings, S. 19-22.

- [7] Wolf, M. et al.: Nichtinvasive Temperaturüberwachung in Gewebephantomen durch orts aufgelöste Messung der Longitudinalwellengeschwindigkeit mittels Ultraschall-Annular-Arrays. *tm-Technisches Messen* 86.2, 2019, S. 82-92.
- [8] Gust, N.: Verbesserung der Signalauswertung für die Ultraschallmikroskopie. TUDpress, 2010.