

Simultane Bestimmung von Dicken und Schallgeschwindigkeiten

Sebastian KÜMMRITZ, Mario WOLF, Elfgard KÜHNICKE
 Technische Universität Dresden, Dresden
 sebastian.kuemmriz@tu-dresden.de

Kurzfassung. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt und diskutiert, mit dem sich Dicken und Schallgeschwindigkeiten von geschichteten Strukturen mit Hilfe von Ultraschall in einem Messvorgang bestimmen lassen. Um dies zu erreichen, werden neben den Laufzeiten zusätzlich die Amplituden der jeweiligen Grenzflächenechos ausgewertet. Diese sind am größten, wenn sich der Fokus auf der entsprechenden Grenzfläche befindet. Um das Maximum im Echosignal zu finden, wird mit Hilfe eines ringförmig segmentierten Ultraschallwandlers (Annular-Array) der Fokuspunkt vor, auf und hinter die Grenzfläche verschoben. Mit dem Verfahren wird ein System aus zwei Schichten untersucht. In der ersten Schicht wird eine Messunsicherheit von 0,27 % und für die zweite Schicht zur Zeit < 2 % erreicht.

1. Einführung

Mittels einfacher Laufzeitmessungen lassen sich von geschichteten Strukturen entweder Dicke oder Schallgeschwindigkeit jeder einzelnen Schicht bestimmen (Abb. 1), sofern für jede Schicht die jeweils andere Größen bekannt ist. In [1] wird ein Verfahren zur gleichzeitigen Bestimmung von Dicke und Schallgeschwindigkeit einer einzelnen Schicht mit Ultraschall diskutiert. Dabei werden verschiedene Schalllaufwege genutzt. Beide Seiten der Probe müssen zugänglich sein. Alternativ können die beiden Größen der unterschiedlichen Schichten mit tomografischen Verfahren [2] bestimmt werden, was jedoch einen hohen Mess- und Auswerteaufwand bedeutet. In der Ultraschallmikroskopie gibt es die Technik der $V(z)$ -Kurven, bei denen die Amplituden der Echos von der untersuchten Probe in Abhängigkeit von der Wandlerverschiebung vertikal zur Probenoberfläche aufgenommen werden [3]. Unter Berücksichtigung der Wandlergeometrie ist es möglich, Probendicke und Schallgeschwindigkeit eines dünnen, einschichtigen Probekörpers zu bestimmen. Dicke und Schallgeschwindigkeit verdeckter Schichten lassen sich damit nicht ermitteln.

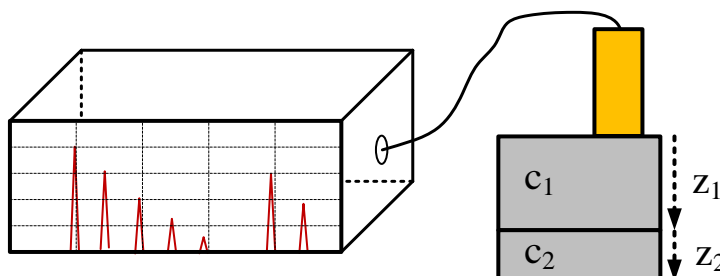


Abb. 1 - Messaufgabe: Gegeben ist eine geschichtete Struktur. Gesucht sind Schallgeschwindigkeit und Dicke jeder Schicht. Durch eine einfache Laufzeitmessungen können diese Größen nicht bestimmt werden.

2. Ansatz

Die Grundidee des Verfahrens beruht darauf, neben der Laufzeit, zusätzlich die Amplitude des reflektierten Signals auszuwerten. Diese hängt davon ab, an welcher Position sich die jeweils betrachtete Grenzfläche im Schallfeld des Schallkopfes befindet. An Abb. 2 soll dieser Umstand anhand der Verschiebung eines fokussierenden Wandlers und einer Schicht mit planparallelen Grenzflächen genauer erklärt werden. Zunächst wird das Oberflächenecho betrachtet. Liegt der Fokus des Wandlers auf der Oberfläche (Pos. 2) wird die Amplitude des Echos maximal. Durch Verfahren des Wandlers entlang der z-Achse sinkt die Amplitude wieder. Das gleiche gilt für das Rückwandecho. Auch bei diesem wird die Amplitude maximal, wenn der Fokus des Wandlers auf der entsprechenden Grenzfläche liegt (Pos. 4). Die Wandlerverschiebung zwischen Pos. 2 und Pos. 4 sowie die Schalllaufzeit T erlaubt einen Rückschluss auf die Probendicke.

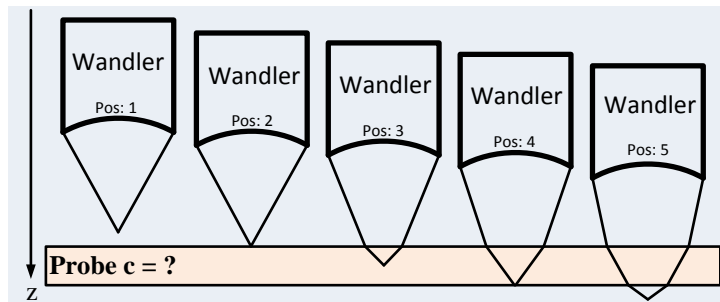


Abb. 2 - Die Amplitude des jeweils betrachteten Echos hängt von der Position der dazugehörigen Grenzfläche im Schallfeld des Ultraschallwandlers ab. Liegt der Fokus auf der Grenzfläche (Pos. 2 - Oberfläche; Pos. 4 - Rückwand), wird das entsprechende Echosignal maximal.

Nun soll jedoch lediglich die Fokusposition bei einer festen Prüfkopfposition variiert werden. Das lässt sich mit einem Annular-Array durch eine zeitverzögerte Ansteuerung der Elemente realisieren. Der Vorteil von Annular-Arrays gegenüber Linien- oder Matrix-Arrays liegt darin, dass für die Fokussierung vergleichsweise wenig Elemente benötigt werden, was den technischen Aufwand deutlich reduziert.

Der in dieser Arbeit verwendete Ultraschallwandler ist eine Spezialanfertigung der Firma Sonaxis. Er besteht aus 10 Segmenten (6 Ringe und 4 Viertelsegmente für Justagezwecke) und hat eine Mittenfrequenz von 15 MHz. Die Innen- (r_i) und Außenradien (r_a) der Segmente sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1 - Innen- und Außenradien der Segmente des verwendeten Annular-Arrays

Elementnummer	1	2	3	4	5	6
r_i [mm]	0,00	2,55	3,64	4,48	5,21	5,86
r_a [mm]	2,45	3,54	4,38	5,11	5,76	6,35

Die Fokussierung erfolgte synthetisch. Dazu wird jedes Segment separat durch Pulse (Pulsdauer: 4 ns, Amplitude: 100 V) angesteuert, während alle Segmente einzeln die Echosignale empfangen. Damit ergeben sich 36 verschiedene Sendempfangskombinationen und folglich auch 36 verschiedene Zeitsignale.

Die Zeitsignale aller Sendempfangskonfigurationen $\text{sig}_{S,E}(t)$ ($S \triangleq$ Sendesegment; $E \triangleq$ Empfangssegment) werden nun, wie in Abb. 3 b) und c) zu sehen, um $\Delta t_{S,E}$ zeitlich verschoben:

$$\text{sig}_{S,E} = \text{sig}_{S,E}(t + \Delta t_{S,E}). \quad (1)$$

Die verschiedenen, zeitlich verschobenen Signale werden anschließend überlagert:

$$\text{sig}_{\text{sum}} = \sum \text{sig}_{S,E}. \quad (2)$$

Ziel ist es, jenen Satz an Verzögerungszeiten

$$\Delta t_{S,E}(c, d) = \begin{pmatrix} \Delta t_{1,1} & \cdots & \Delta t_{N,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta t_{1,N} & \cdots & \Delta t_{N,N} \end{pmatrix} \quad (3)$$

zu finden (N symbolisiert hier die Anzahl der verwendeten Ringsegmente), bei denen die Amplitude des Summensignals sig_{sum} maximal wird. Dabei sind die Verzögerungszeiten in dem genutzten Modell von Schallgeschwindigkeit und Dicke der jeweiligen Schicht abhängig. Zusammen mit der gemessenen Schalllaufzeit, die ebenfalls als Funktion von Schallgeschwindigkeit c und Schichtdicke z betrachtet werden kann

$$T(c, z) = \frac{2z}{c}, \quad (4)$$

ist die Bestimmung der beiden gesuchten Größen möglich.

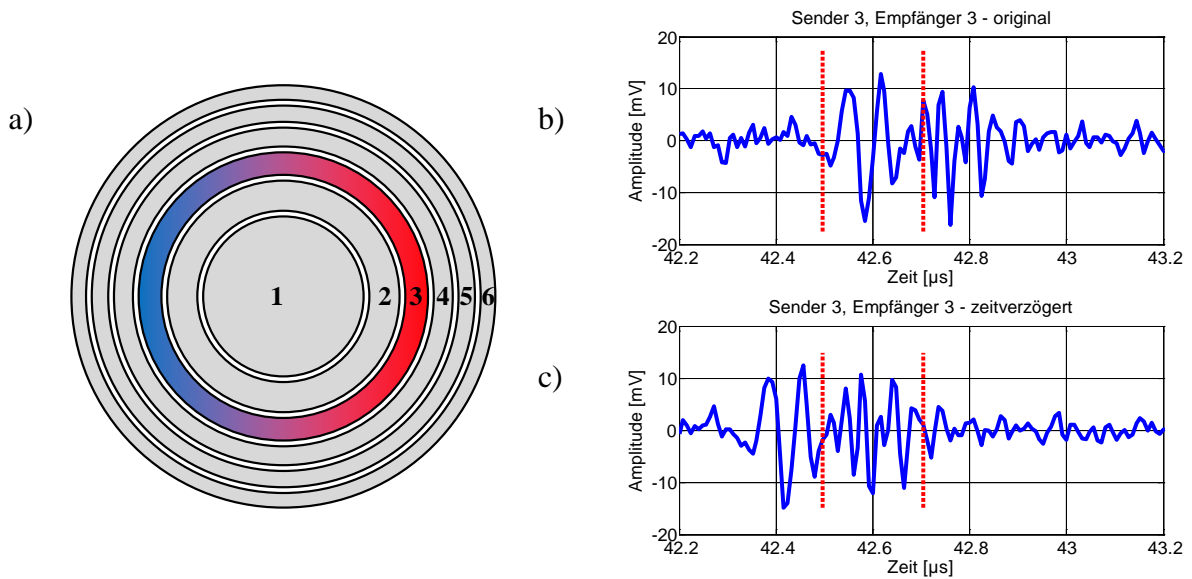


Abb. 3 - Draufsicht auf den verwendeten Ultraschallwandler (a); An ebener Grenzfläche reflektiertes Zeitsignal (Sender und Empfänger: Segment 3) vor (b) und nach (c) zeitlicher Verschiebung.

Um das zeitverzögerte, überlagerte Signal (Abb. 4 - blaue Kurve) auszuwerten, kann prinzipiell die Amplitude genommen werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Fläche unter der Einhüllenden (Abb. 4 - rot schraffierter Bereich), die ein Maß für die Signalenergie ist, eine wesentlich robustere Auswertegröße darstellt.

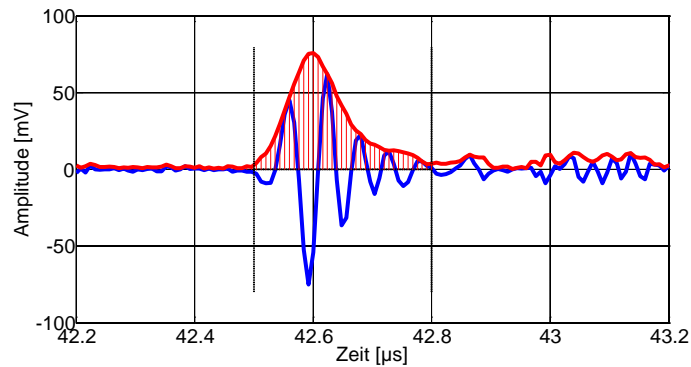


Abb. 4 - Zeitsignal (blau), Einhüllende des Signals (rote Kurve) und Fläche unter der Einhüllenden (rote Schraffur), die ein Maß für die Signalenergie ist.

3. Methode und Ergebnisse

Schicht 1

Um die Lage der Grenzfläche zu ermitteln, wird die Fokusposition variiert. Zuerst soll dazu die Fokussierung im einschichtigen Medium betrachtet werden. Zur Berechnung der Verzögerungszeiten für jeden Fokuspunkt, sind zunächst die unterschiedlichen Laufwege $d_{S,E}$ zwischen den Konfigurationen Sender-Fokusort-Empfänger von Interesse. Abb. 5 zeigt einige davon. Links befindet sich das Annular-Array mit seinen sechs Ringelementen. Das Ziel ist, auf die Grenzfläche zwischen Medium 1 und Medium 2 zu fokussieren, die sich im Abstand z_1 befindet. Da der tatsächliche Abstand nicht bekannt ist, wird zunächst auf eine angenommene Grenzfläche in der Tiefe z_1' fokussiert. Die angenommene Reflektortiefe z_1' wird so lange variiert, bis das fokussierte Signal maximal wird. Klassisch wird zur Fokussierung der Fokuspunkt auf der Achse gewählt (roter Punkt). Für den Fall, dass das Sendeelement gleich dem Empfangselement ist, ergibt sich der gleiche Winkel zwischen eintreffendem und reflektierten Schall (roter Punkt, durchgezogene Linien). Bei ungleichen Sende-Empfangs-Kombinationen ergeben sich allerdings unterschiedliche Winkel zwischen den Schalllaufwegen vom Sende-Element zum Fokuspunkt und vom Fokuspunkt zum Empfangs-Element (roter Punkt, gepunktete Linien). Das Ziel des Verfahrens ist es, das fokussierte Signal zu maximieren. Aus diesem Grund ist es sinnvoller, nicht auf die akustische Achse zu fokussieren, sondern vielmehr den Laufweg anzunehmen, bei dem die Winkel zwischen einfallendem und reflektiertem Schall identisch sind (grüner Punkt, gestrichelte Linien), d. h. zur Berechnung der Ansteuerzeiten wird nicht von einem Fokuspunkt, sondern von einer Fokusebene ausgegangen:

$$d_{S,E} = 2 \cdot \sqrt{z_1^2 + \left(\frac{r_S + r_E}{2}\right)^2}. \quad (5)$$

r_S bzw. r_E stehen für die Radien der Flächenschwerpunkte

$$r_{S,E} = \frac{1}{A} \int_{r_i}^{r_a} r \cdot (2\pi r) dr = \frac{2\pi}{3A} (r_a^3 - r_i^3) \quad (6)$$

und A für die Fläche der jeweiligen Wandlersegmente. Die benötigten Laufzeiten ergeben sich aus der Division der Laufwege durch die Schallgeschwindigkeit von Medium 1 (die zunächst frei gewählt wird). Die Verzögerungszeiten der einzelnen Sende-Empfangs-Konfigurationen resultieren wiederum aus:

$$T_{S,E} = \frac{d_{S,E}}{c_1} - \frac{d_{1,1}}{c_1}. \quad (7)$$

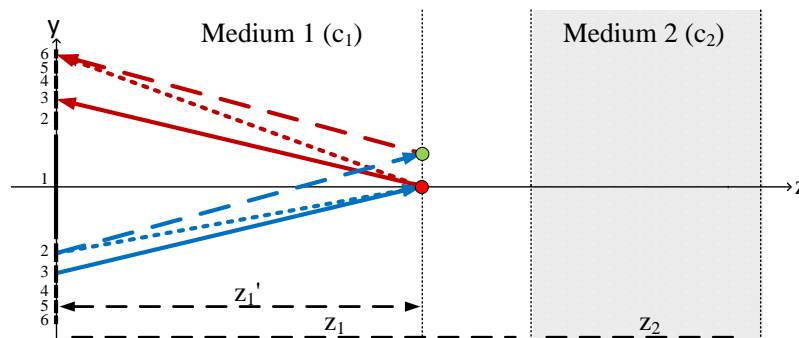


Abb. 5 - Skizze des Querschnitts der Messanordnung zur Berechnung der Verzögerungszeiten für eine angenommene Reflektortiefe z_1' aus den Laufwegen: Dargestellt sind drei mögliche Laufwegskonfigurationen vom Sender zum Fokus (blau) und zurück zum Empfänger (rot) - a) Sender 3 → Fokuspunkt auf der Achse (roter Punkt) → Empfänger 3; b) Sender 2 → Fokuspunkt auf der Achse → Empfänger 6; c) Sender 2 → Fokuspunkt auf der Ebene (grüner Punkt) → Empfänger 6

Als nächstes muss der Bereich definiert werden, innerhalb dessen das fokussierte Signal ausgewertet wird. Abb. 6 zeigt das Sende-Empfangssignal des Zentralelementes. Hier wird anhand des Signalbeginns und -endes ein Zeitfenster gesetzt. Start und Ende resultieren aus dem Bereich, in denen die Signalamplitude verglichen mit ihrem Maximum auf -12 dB abgefallen ist.

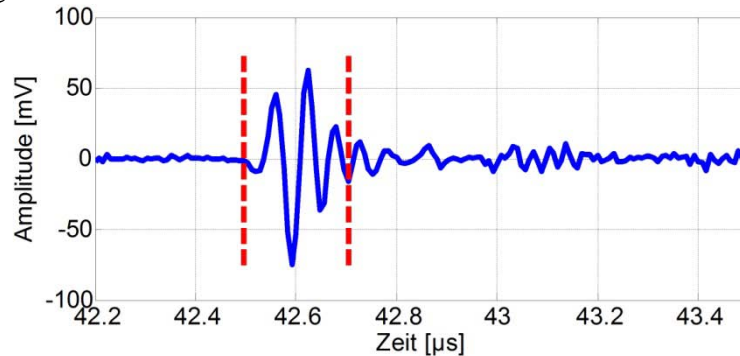


Abb. 6 - Zeitsignal (blau) des Zentralelementes und gewähltes Zeitfenster (rot): Start und Ende des Zeitfensters wurden aus dem Bereich ermittelt, an denen die Signalamplitude gegenüber dem Maximum um 12 dB abgefallen ist.

Abgesehen für die Anordnung Sender = Empfänger = Zentralelement existieren für jede Sende-Empfangs-Konfiguration zwei verschiedene Schalllaufwege. Für das Beispiel Sender 2 - Empfänger 6 sind diese in Abb. 7 dargestellt. Dementsprechend gibt es zwei Signalanteile, einen frühen (über Laufweg 1, durchgezogene Linien) und einen späteren (gestrichelte Linien). Diese beiden Signalanteile sind in Abb. 3 deutlich zu sehen. Hier ist das Zeitsignal der Konfiguration Sender 3 - Empfänger 3 zusammen mit dem definierten Zeitfenster dargestellt (oben). In diesem Fall entspricht Laufweg 1 dem direkten Weg zum Reflektor bei normalem Schalleinfall und zurück zum Empfänger. Durch eine zeitliche Verschiebung des Signals mit der korrekten Verzögerungszeit, liegt das zweite Echo genau im Zeitfenster (unten). Wird dies für alle Sende-Empfangs-Konfigurationen durchgeführt, wird das Summensignal maximal.

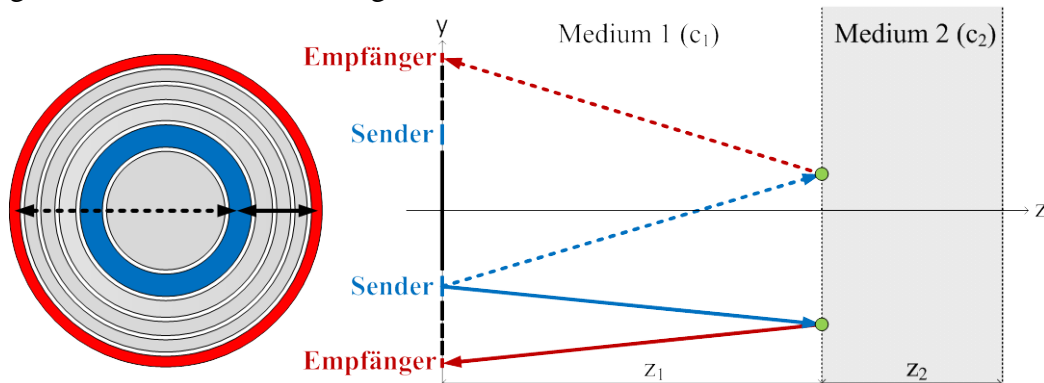


Abb. 7 - Skizze der unterschiedlichen Laufwege: Zwischen jeder Konfiguration Sender-Empfänger existieren je zwei mögliche Schalllaufpfade: ein kurzer (durchgezogene Linien) und ein langer (gestrichelte Linien).

Im Folgenden soll die gleichzeitige Schallgeschwindigkeits- und Schichtdickenbestimmung für ein einschichtiges Medium an einem konkreten Beispiel demonstriert werden. Gegeben ist eine Stahlplatte, die sich in einem Abstand z_1 von 30 mm vor dem Ultraschallwandler in Wasser ($c_1 = 1482$ m/s) befindet. Beide Größen sind a priori nicht bekannt.

Für das Ausbreitungsmedium wird eine Schallgeschwindigkeit $c = 1000$ m/s angenommen. Es wird auf jede mögliche Reflektortiefe fokussiert, und die Energie des Summensignals als Funktion der jeweils verwendeten Reflektortiefe aufgetragen (blaue Kurve in Abb. 8). Es ist zu sehen, dass bei der (Flächen-)Fokussierung auf 34,7 mm die

Signalenergie maximal wird. Entspreche die Schallgeschwindigkeit des Mediums 1000 m/s, läge der dazugehörige Reflektorort dementsprechend bei 34,7 mm.

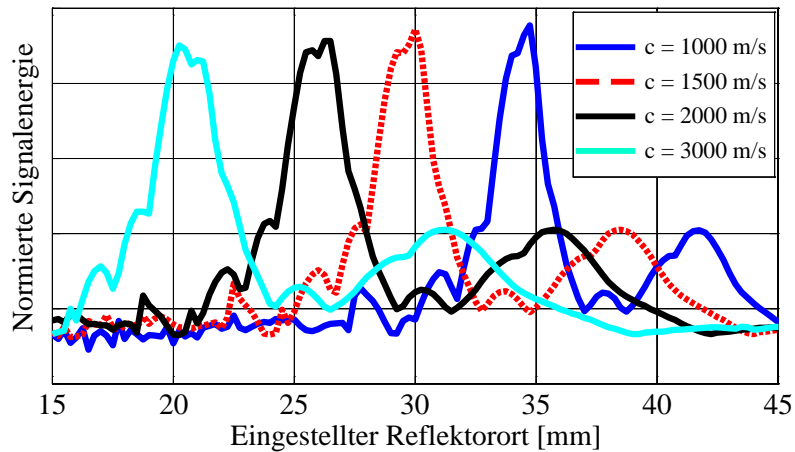


Abb. 8 - Signalenergie des überlagerten Signals in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Fokussierungstiefen: Aus jeder angenommenen Schallgeschwindigkeit resultiert ein dazugehöriger Reflektorort.

Da die Schallgeschwindigkeit des Mediums nicht bekannt ist, muss dieses Verfahren für unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten wiederholt werden. Wie in Abb. 8 zu sehen, ergibt sich für jede angenommene Schallgeschwindigkeit ein anderer dazugehöriger Reflektorabstand. Der Fall $c = 1500$ m/s (rot gestrichelte Linie) entspricht der tatsächlichen Messkonfiguration. Hier ist zu sehen, dass bei korrekter Wahl der Schallgeschwindigkeit für die Fokussierung, der resultierende Reflektorabstand dem wirklichen entspricht. Die ermittelten Reflektororte werden in Abhängigkeit von der gewählten Schallgeschwindigkeit aufgetragen (Abb. 9 rote Punkte) und mit einer Hyperbel (blaue Kurve) approximiert.

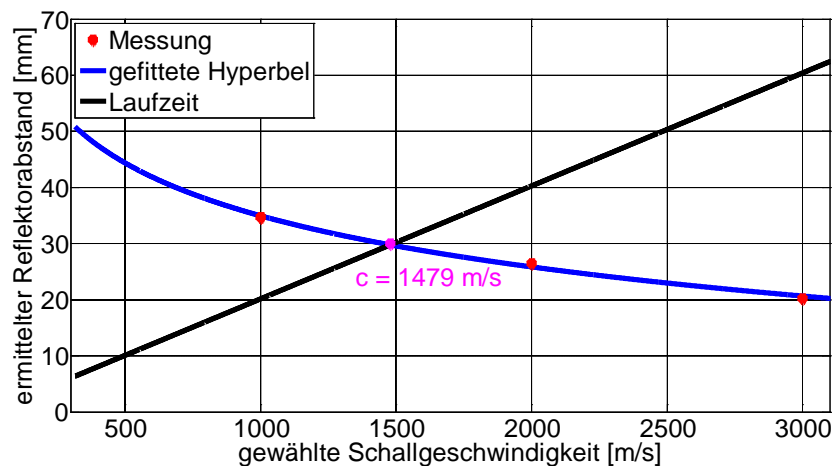


Abb. 9 - Ermittelter Reflektorort in Abhängigkeit von der gewählten Schallgeschwindigkeit. Rote Punkte: Ermittelte Reflektorpositionen bei denen die Signalenergie für die jeweils gewählte Schallgeschwindigkeit maximal wird. Blaue Kurve: Anhand der ermittelten Reflektorpositionen gefittete Hyperbel. Schwarze Kurve: Reflektorabstand als Funktion der Schallgeschwindigkeit und der gemessenen Schalllaufzeit zum Reflektor. Magenta Punkt: Schnittpunkt der Kurven → ermittelte Schallgeschwindigkeit.

Um aus der so ermittelten Funktion das tatsächliche Paar aus Schallgeschwindigkeit und Reflektorabstand zu bestimmen, wird die gemessene Schalllaufzeit T herangezogen. Wird der Reflektorort in dieses Diagramm als Funktion der Schallgeschwindigkeit aufgetragen, entspricht das einer Geraden. Der Schnittpunkt der beiden Funktion liefert die gesuchte Schallgeschwindigkeit.

Die im gezeigten Beispiel ermittelte Schallgeschwindigkeit des Wassers lag bei 1479 m/s. Zur Überprüfung fand eine konventionelle Messung statt, bei der die Laufzeiten

bei zwei unterschiedlichen Wandlerpositionen gemessen wurden. Aus der Laufzeitdifferenz T zwischen den beiden Zeitsignalen und der Wandlerverschiebung d konnte die Schallgeschwindigkeit mit Formel 5 bestimmt werden. Es ergab sich dabei einen Wert von 1482 m/s, womit der absolute Fehler des vorgestellten Messverfahrens gegenüber der konventionellen Messung in diesem Beispiel bei 0,27 % liegt.

In [4] fand mit dem vorgestellten Verfahren eine systematische Untersuchung in unterschiedlichen Medien bei unterschiedlichen Reflektorabständen statt. Es wurde gezeigt, dass eine genaue Justage des Wandlers essentiell ist und eine leichte Verkipfung zu einem systematischen Fehler führt.

Schicht 2

Nachdem c_1 und z_1 für die erste Schicht bestimmt wurden, wird das Verfahren auf die zweite Schicht angewendet. Der wesentliche Unterschied ist hier, dass die Brechung des Schalls an der Grenzfläche zwischen Medium 1 und Medium 2 berücksichtigt werden muss (Abb. 10).

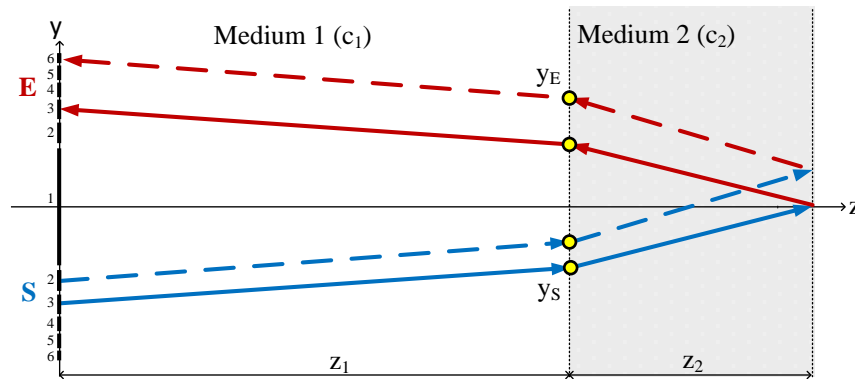


Abb. 10 - Schalllaufwege unter Berücksichtigung der Brechung des Schalls an der Grenzfläche zwischen Medium 1 und Medium 2

Um die Schalllaufwege zu berechnen, werden die Punkte y_S und y_E benötigt (gelbe Punkte in Abb. 10), an denen der Schall die Grenzfläche zwischen Medium 1 und Medium 2 passiert. Mit ihnen ergeben sich die Schalllaufzeiten aus

$$T_S = \frac{\sqrt{(r_S + y_S)^2 + z_1^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{\left(\frac{r_E - r_S}{2} - y_S\right)^2 + z_2^2}}{c_2} \quad (8)$$

und

$$T_E = \frac{\sqrt{(r_E - y_E)^2 + z_1^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{\left(\frac{r_E - r_S}{2} - y_E\right)^2 + z_2^2}}{c_2} \quad (9)$$

Zur Berechnung der Punkte y_S und y_E kann das FERMAT'sche Prinzip herangezogen werden:

$$\frac{dT_S(y_S)}{dy_S} = 0 \text{ bzw. } \frac{dT_E(y_E)}{dy_E} = 0. \quad (10)$$

Mit diesem Verfahren wurden bei einer Stahlplatte ($c = 5920$ m/s) mit einer Dicke von $z_2 = 6,03$ mm nach einem Wasservorlauf ($c = 1482$ m/s) von $z_1 = 30,05$ mm Plattendicke und Schallgeschwindigkeit bestimmt. Für eine statistische Auswertung wurde der Wandler in der x-y Ebene an neun verschiedene Punkte über der Stahlplatte verfahren. Es ergaben sich eine Schallgeschwindigkeit von 5943 ± 105 m/s und damit eine Schichtdicke von $z_2 = 6,05 \pm 0,11$ mm. Die mittlere Messabweichung betrug damit 1,8 %.

4. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die simultane Bestimmung von Schallgeschwindigkeiten und Schichtdicken von bisher zwei Schichten möglich ist. Für die erste Schicht liegt die Messunsicherheit im Promillebereich, womit das Verfahren sogar eine Alternative zu konventionellen Laufzeitverfahren darstellt, bei denen jeweils eine der beiden Größen als bekannt vorausgesetzt oder separat bestimmt werden muss. Im Fall der zweiten Schicht ist die Messunsicherheit momentan noch deutlich höher. So hängt das Ergebnis des Verfahrens beispielsweise stark von der Wahl des Zeitfensters ab. Ist es zu klein, zu groß, oder wird der Startpunkt zu spät oder zu früh gewählt, funktioniert das Verfahren nicht mehr.

Bei allen bisher durchgeführten Untersuchungen wurde eine synthetische Fokussierung verwendet, d. h. die Signale der unterschiedlichen Sende-Empfangs-Konfigurationen wurden nach der Messung zeitlich verschoben und überlagert. Eine zusätzliche zeitverzögerte Ansteuerung der Elemente während der Messung (elektronische Fokussierung), kann das Ergebnis durch eine Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses verbessern.

Eine Adaption des Verfahrens auf eine dritte Schicht sollte möglich sein. Um für die dritte Schicht geringe Messunsicherheiten zu gewährleisten, müssen die Schallgeschwindigkeiten und Dicken der vorgelagerten Schichten genau bekannt sein. Aus diesem Grund ist es notwendig die Genauigkeit der Schallgeschwindigkeits- und Dickenbestimmung für die zweite Schicht zu verbessern. Außerdem muss bei mehrschichtigen Systemen die eindeutige Zuordnung der unterschiedlichen Echos zu den unterschiedlichen Grenzflächen gewährleistet sein.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung des Projektes KU1075/14-1 sowie der Firma Sonaxis SA für die Wandlerherstellung.

Referenzen

- [1] D. K. Hsu, M. S. Hughes: Simultaneous ultrasonic velocity and sample thickness measurement and application in composites, *J. Acoust. Soc. Am.* **92**:2 (1992) 669-675
- [2] G. Steiner, C. Deinhammer: Ultrasonic time-of-flight techniques for monitoring multi-component processes, *E & I Elektrotechnik und Informationstechnik* **126**:5 (2009) 200-205
- [3] Z. Yu, S. Boseck: Scanning acoustic microscopy and its applications to material characterization, *Rev. Mod. Phys.* **67**:4 (1995) 863:891
- [4] S. Kümritz, M. Wolf, E. Kühnicke: Simultaneous Measurement of Thickness and Sound Velocities of Each Layer in Multi-Layered Structures, *Joint UFFC-EFTF-PFM Symp. proceedings*, Prag (2013)