

Neuer Ansatz zur zerstörungsfreien Bestimmung von Materialeigenschaften mit Ultraschall

Sebastian Kümritz, Mario Wolf, Elfgard Kühnicke

TU Dresden - Institut für Festkörperelektronik, 01069 Dresden, Deutschland, Email: sebastian.kuemritz@tu-dresden.de

Einleitung

Schallgeschwindigkeitsmessungen bieten einen zerstörungsfreien Zugang zur Bestimmung von Materialeigenschaften, da die Geschwindigkeiten für Longitudinal- und Transversalwelle aus der Dichte und den elastischen Konstanten resultieren. Zur Bestimmung einer Schallgeschwindigkeit werden Laufweg und Laufzeit benötigt, die der betrachtete Wellentyp von einem Sender zu einem Empfänger benötigt. In der Regel werden die Laufzeit mit Ultraschall und der Laufweg mit einem anderen Verfahren gemessen. Da Laufzeitmessungen sehr präzise sind, hängt die Genauigkeit von Schallgeschwindigkeitsmessungen primär von der Genauigkeit bei der Bestimmung des Laufweges ab.

Im einfachsten Fall handelt es sich bei dem zu charakterisierenden Material um eine Platte mit konstanter Dicke. Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit wird die Laufzeit zwischen der Oberfläche und der Rückwand gemessen. Der Laufweg entspricht der Dicke der Probe, welche mit einer Messschraube bestimmt werden kann. Ist die Probe nicht gleichmäßig dick, muss sichergestellt werden, dass die Laufzeitmessung an der gleichen Stelle wie die Dickenmessung durchgeführt wird, was sehr hohe Anforderungen an eine präzise Messdurchführung voraussetzt [1].

In [2] haben wir einen Ansatz vorgestellt, mit dem sich Schichtdicken und Schallgeschwindigkeiten von zweischichtigen Medien bei einer einzelnen Messung bei nur einseitiger Zugänglichkeit simultan bestimmen lassen. In diesem Beitrag wird das Verfahren an der zweiten Schicht an Systemen bestehend aus einer Wasserschicht und unterschiedlichen Metallplatten demonstriert und validiert. Weiterhin wird gezeigt, dass der Messaufbau zusätzlich die Bestimmung der Transversalwellengeschwindigkeit ermöglicht.

Stand der Technik

In [3] wird ein Verfahren zur simultanen Bestimmung von Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit beschrieben, welches zwei Ultraschallwandler nutzt, die gleichzeitig in Reflexion und in Transmission arbeiten. Die Wandler werden so positioniert, dass sie sich gegenüber stehen und sich die zu vermessende Probe dazwischen befindet (siehe Abbildung 1). Die unterschiedlichen gemessenen Schalllaufzeiten zwischen den Wandlern und den Grenzflächen der Probe (Oberfläche und Rückwand) sowie die bekannte Schallgeschwindigkeit des Mediums in der Messstrecke (z. B. Wasser) ermöglicht die simultane Bestimmung von Probendicke und -schallgeschwindigkeit. Aufgrund der

Auswertung der unterschiedlichen Laufzeiten, wird dieses Verfahren im folgenden als Laufzeitverfahren bezeichnet.

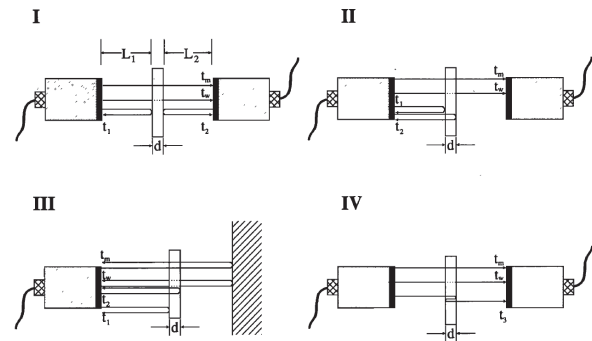


Abbildung 1: Messaufbau zur simultanen Bestimmung von Dicke und Schallgeschwindigkeit einer Platte nach [3]

Nachteilig bei dem Laufzeitverfahren ist der aufwendige Messaufbau. Die Wandler müssen sich exakt gegenüberstehen und die Probenoberfläche sollte normal zur Schalleinfallrichtung ausgerichtet sein. Um die Probe in den Messaufbau zwischen den beiden Wandler zu positionieren, muss sie allseitig zugänglich sein. Zudem ist die exakte Schallgeschwindigkeit des Mediums der Messstrecke erforderlich.

Ein Ansatz zur simultanen Bestimmung von Dicke und Schallgeschwindigkeit bei nur einseitiger Zugänglichkeit wird in [4] diskutiert. Zwei Wandler werden dazu in Tandem-Technik auf der Probenoberfläche angebracht. Es wird der Abstand zwischen den beiden Wandlern sowie die Laufzeit gemessen, die der Schall von einem Wandler über die Rückwand zum zweiten Wandler benötigt. Anschließend wird der Abstand zwischen den beiden Wandlern variiert und die Messung wiederholt. Aus den beiden Laufzeiten sowie den beiden Wandlerabständen kann die Probendicke ermittelt werden. Die Probendicke wiederum ermöglicht die Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten für Longitudinal- und Transversalwelle.

Problematisch hierbei ist die direkte Ankopplung der Wandler an die Probe, was eine hohe Oberflächengüte erfordert. Außerdem ist das Verfahren sehr empfindlich gegenüber Dickenschwankungen der Probe. Da die Reflexionspunkte beider Messungen an verschiedenen Stellen der Rückwand liegen, muss die Probe dort jeweils gleich dick sein.

Gleichzeitigen Bestimmung von Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit

Zur simultanen Bestimmung von Schichtdicke und Longitudinalwellengeschwindigkeit geschichteter Strukturen bei nur einseitiger Zugänglichkeit wird neben der Laufzeit zusätzlich die Amplitude ausgewertet. Die Amplitude einer Ultraschallwelle die an einer ebenen Grenzfläche reflektiert wird, hängt von der Lage der Grenzfläche im Schallfeld des Wandlers ab. Die Amplitude ist maximal, wenn sich die Grenzfläche im Fokus des Wandlers befindet. Die Fokusslage wiederum ist von den Wandlereigenschaften und der Schallgeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium abhängig.

Die Idee des Verfahrens basiert darauf, die Fokusslage so lange zu variieren, bis die Amplitude des Grenzflächenechos maximal wird. Aus diesem Grund wird das Verfahren im folgenden als Fokussierungsverfahren bezeichnet. Eine Variation der Fokusslage lässt sich durch Fokussierung mit Annular-Arrays erreichen. Die Fokussierung kann dabei elektronisch oder synthetisch erfolgen. Bei der elektronischen Fokussierung werden die Elemente zeitverzögert angesteuert. Synthetische Fokussierung wird erreicht, indem jedes Element einzeln sendet, die übrigen Elemente die reflektierten Signale empfangen und anschließend alle Signale entsprechend der Verzögerungszeiten verschoben und überlagert werden.

Zur Berechnung der notwendigen Verzögerungszeiten wird ein einfaches geometrisches Modell verwendet. Die Verzögerungszeiten zur Fokussierung auf die hintere Grenzfläche der betrachteten Schicht ergeben sich aus den Differenzen der Schalllaufzeiten vom Zentralelement zur Grenzfläche und vom jeweiligen Wandlerelement zur Grenzfläche. Abbildung 2 zeigt den Schalllaufweg durch eine zweischichtige Anordnung vom Punkt y_N auf dem Wandlerelement N zum Reflexionspunkt auf der Rückwand, der sich nach FERMAT auf der akustischen Achse befinden muss. d_1 und d_2 stehen für die Dicken sowie c_1 und c_2 für die Schallgeschwindigkeiten der jeweiligen Schichten.

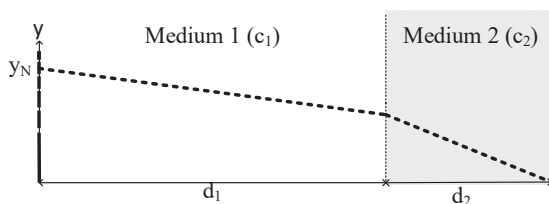


Abbildung 2: Modell des Schalllaufweges von Element N zum Fokus zur Berechnung der Verzögerungszeiten

Die Schallgeschwindigkeiten und Dicken werden sukzessive für jede Schicht bestimmt. Die gemessene Schalllaufzeit zwischen den Grenzflächen resultiert aus der Dicke und der Schallgeschwindigkeit der jeweils betrachteten Schicht:

$$T_n = \frac{2d_n}{c_n}. \quad (1)$$

Zur Berechnung der Verzögerungszeiten wird die Schallgeschwindigkeit oder die Schichtdicke variiert, die jeweils andere Größe ergibt sich aus der Schalllaufzeit. Entspricht die gewählte Größe der tatsächlichen Dicke, bzw. der tatsächlichen Schallgeschwindigkeit im Material, ist die Amplitude des fokussierten Signals maximal.

Das Vorgehen soll anhand eines Beispiels genauer erläutert werden. Untersucht wird eine Schicht aus Epoxidharz (EpoTek 301-2) in Wasser ($c = 1485 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) nach einem Vorlauf von 20 mm. Die Schallgeschwindigkeit des Epoxidharzes wird als variable Größe zur Fokussierung gewählt. Die Schichtdicke ergibt sich über Gleichung 1 aus der gemessenen Schalllaufzeit zwischen den beiden Grenzflächen in der Epoxidharzschicht und der angenommenen Schallgeschwindigkeit. Zunächst werden die Verzögerungszeiten für eine angenommene Schallgeschwindigkeit von $2000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ berechnet. Bei einer gemessenen Laufzeit von $11 \mu\text{s}$ entspräche das einer Schichtdicke von 11 mm. Das mit diesen Verzögerungszeiten fokussierte Signal ist in Abbildung 3 oben links dargestellt. Die Amplitude des fokussierten Signals wird als Funktion der gewählten Schallgeschwindigkeit aufgetragen (Abbildung 3 unten). Diese Kurve wird als Fokusskurve bezeichnet. Wird die Schallgeschwindigkeit zur Berechnung der Fokussierung erhöht, steigt zunächst die Amplitude an. Im Beispiel ist das fokussierte Signal maximal (Abbildung 3 oben Mitte), wenn zur Berechnung der Verzögerungszeiten eine Schallgeschwindigkeit von $2630 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gewählt wird. Bei weiterer Erhöhung der Schallgeschwindigkeit sinkt die Amplitude des fokussierten Signals wieder (Abbildung 3 oben rechts). Anhand des Maximums der Fokusskurve kann die tatsächliche Schallgeschwindigkeit im Material abgelesen werden. Im vorliegenden Beispiel wurde für das Epoxidharz eine Schallgeschwindigkeit von $2630 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (und damit einer Schichtdicke von 14,4 mm) bestimmt, was in guter Übereinstimmung mit dem Wert von $2640 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ist, der von [5] für EpoTek 301-2 angegeben wird.

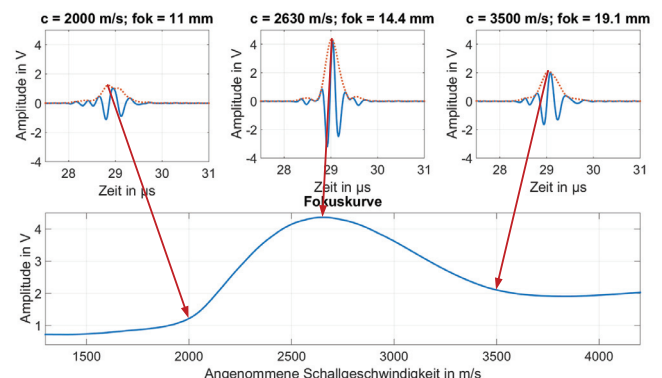


Abbildung 3: oben: Fokussierte Signale, die sich aus den mit drei unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten berechneten Verzögerungszeiten ergeben; unten: Amplituden der fokussierten Signale in Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit, die zur Berechnung der Verzögerungszeiten genutzt wurden (Fokusskurve)

Messungen

Um das Verfahren für die 2. Schicht mit dem Laufzeitverfahren von [3] zu validieren, sind die Bedingungen für das Laufzeitverfahren einzuhalten. Deshalb wird als 1. Schicht Wasser gewählt und die zweite Schicht stellen Stahl- bzw. Aluminiumplatten mit unterschiedlichen Dicken dar. Zudem wurden die exakten Dicken der Proben mittels einer Konturmessung durch die Fa. L&W Gesellschaft für Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung mbH, einem akkreditiertem Kalibrierlaboratorium, orts aufgelöst bestimmt.

Die Proben wurden an einem Positioniersystem bestehend aus drei Linearachsen und zwei Rotationsachsen befestigt. Die Linearachsen ermöglichten einen Scan und somit die Bestimmung von Dicke und Schallgeschwindigkeit an verschiedenen Stellen der Proben. Mit den Rotationsachsen konnten die Proben planparallel zwischen dem verwendeten Annular Array und einem Normalprüfkopf ausgerichtet werden. Die beiden Wandler haben eine Mittelfrequenz von 6 MHz und standen sich bei der Messung exakt gegenüber. Das Array wurde für die Fokussierungsmethode genutzt, während der zusätzliche Normalschallkopf (Radius $r = 2,3$ mm) für das Laufzeitverfahren benötigt wurde. Die Innen- (r_i) und Außenradien (r_a) des Annular Arrays sind in Tabelle 1 gelistet. Bei allen Messungen betragen die Abstände von den Wandlern zu den Probenoberflächen ungefähr 20 mm. Die Anregung der Wandlerelemente erfolgte mit Pulsen (Pulsdauer: 6 ns; Amplitude: 20 V).

Tabelle 1: Innen- (r_i) und Außenradien (r_a) des für die Auswertung verwendeten Annular Arrays

r_i [mm]	0,00	2,44	3,51	4,36	5,10	5,77
r_a [mm]	2,24	3,31	4,16	4,90	5,57	6,58

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2 und 3 zusammengefasst. Die Dicken und Schallgeschwindigkeiten wurden an mehreren Stellen der Proben bestimmt. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, sind in den Tabellen die Mittelwerte und die Standardabweichungen der ermittelten Dicken und Schallgeschwindigkeiten angegeben. Die Spalte unter d_{Kont} zeigt die Plattendicken, die sich aus der Konturmessung ergeben. Während die Dicke der Stahlplatten um maximal 10 μm variiert, haben die Aluminiumplatten einen Dickengradienten der einen Dickenunterschied zwischen der dünnsten und der dicksten Stelle um bis zu 41 μm zur Folge hat. Dies spiegelt sich bei den Ergebnissen für die Konturmessung in der höheren Standardabweichung bei den Aluminiumplatten wider.

In den Spalten unter d_T und c_T stehen die Ergebnisse für die Dicken und Schallgeschwindigkeiten aus dem Laufzeitverfahren. Der Vergleich zwischen d_{Kont} und d_T zeigt, dass die Ungenauigkeit des Laufzeitverfahrens unter 2 Promille liegt.

Die Ungenauigkeit der mit Fokussierungsverfahren er-

Tabelle 2: Ergebnisse mit Mittelwert und Standardabweichung der Stahlplatten: d_{Kont} Dicke aus der Konturmessung; d_T Dicke aus dem Laufzeitverfahren; c_T Schallgeschwindigkeit aus dem Laufzeitverfahren; c_{Fok} Schallgeschwindigkeit aus dem Fokussierungsverfahren

	d_{Kont} [μm]	d_T [μm]	c_T [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]	c_{Fok} [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]
1	3907 ± 2	3900 ± 3	5903 ± 2	5951
2	5749 ± 2	5739 ± 2	5925 ± 2	5911
3	7789 ± 1	7787 ± 3	5951 ± 2	5913
4	9800 ± 1	9800 ± 2	5933 ± 2	5927
5	13840 ± 1	13845 ± 2	5939 ± 3	5929
6	15908 ± 1	15921 ± 3	5937 ± 3	5981

Tabelle 3: Ergebnisse mit Mittelwert und Standardabweichung der Aluminiumplatten: d_{Kont} Dicke aus der Konturmessung; d_T Dicke aus dem Laufzeitverfahren; c_T Schallgeschwindigkeit aus dem Laufzeitverfahren; c_{Fok} Schallgeschwindigkeit aus dem Fokussierungsverfahren

	d_{Kont} [μm]	d_T [μm]	c_T [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]	c_{Fok} [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]
1	3701 ± 10	3701 ± 16	6409 ± 5	6426
2	5946 ± 10	5938 ± 12	6430 ± 6	6216
3	7725 ± 10	7712 ± 13	6438 ± 5	6235
4	9481 ± 10	9490 ± 6	6432 ± 7	6243
5	13756 ± 7	13757 ± 8	6425 ± 7	6243
6	15496 ± 8	15504 ± 12	6426 ± 6	6279

mittelten Dicken verhält sich analog zur Ungenauigkeit der ermittelten Schallgeschwindigkeiten c_{Fok} . Zur Abschätzung der Genauigkeit genügt daher der Vergleich zwischen c_{Fok} und c_T . Bei den Stahlplatten liegt die Abweichung der Ergebnisse des Fokussierungsverfahrens im Vergleich zum Laufzeitverfahren im Bereich zwischen 2 und 8 Promille. Die Abweichung bei den Aluminiumplatten liegt hingegen, abgesehen von der dünnsten Platte, zwischen 2,3 und 3,5%.

Die Ursache für diese Ungenauigkeit wird in der Textur der Aluminiumproben vermutet. Um eine hohe Oberflächengüte zu erreichen, wurden die Aluminiumproben glatt gefräst. Als Folge dieses Fräsvorganges sind optisch Kreisstrukturen auf den Proben erkennbar, die sich nicht in den Konturmessungen widerspiegeln und daher wahrscheinlich auf die Textur zurückzuführen sind. Die Textur beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Materials [6] und bewirkt damit unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten an verschiedenen Stellen der Probe.

Abbildung 4 zeigt die mit dem Laufzeitverfahren und mit dem Fokussierungsverfahren bestimmten Schallgeschwindigkeiten der 8 mm Aluminiumplatte in Abhängigkeit von der Plattenposition. Die Schallgeschwindigkeiten in der Probe zeigen eine merkliche Ortsabhängigkeit. Interessant ist hierbei, dass zwar beide Verfahren qualitativ ähnliche Bilder zeigen, sich die Werte aber genau entgegengesetzt verhalten. Das heißt, an den Stellen an denen mit dem Laufzeitverfahren die maximale Schallgeschwindigkeit ermittelt wird zeigt das Fokussierungsverfahren die geringsten Werte. Das liegt daran, dass mit dem Fokussierungsverfahren im Vergleich zum Laufzeitverfahren

ein deutlich größeres Volumen durchschallt wird. Örtliche Variationen der mechanischen Eigenschaften machen sich daher stärker bemerkbar.

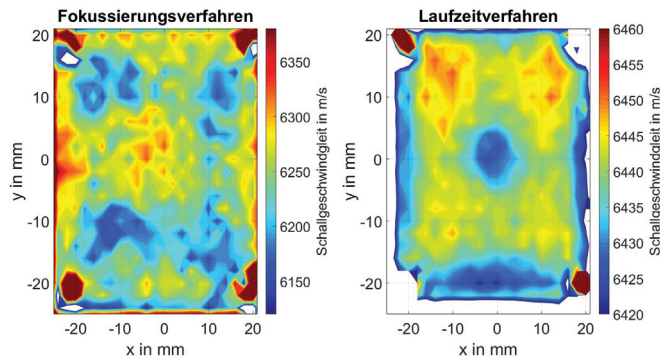


Abbildung 4: Mit dem Fokussierungsverfahren (links) und dem Laufzeitverfahren (rechts) ermittelte Schallgeschwindigkeitsverteilung der 8 mm Aluminiumplatte

Bestimmung der Transversalwellengeschwindigkeit

Trifft eine ebene Longitudinalwelle senkrecht auf eine Grenzfläche, so ist der an der Grenzfläche reflektierte Anteil ebenfalls eine Longitudinalwelle. Bei leicht schrägem Einfallswinkel findet jedoch eine Modenumwandlung statt, d. h. ein Teil der reflektierten Welle breitet sich als Transversalwelle aus. Dies kann mit Annular-Arrays erreicht werden, indem unterschiedliche Ringelemente für das Senden und das Empfangen genutzt werden. Abbildung 5 zeigt zwei Zeitsignale von der 6 mm Aluminiumprobe. Zu sehen sind jeweils das erste und zweite Rückwändecho beim Senden und Empfangen mit Element 1 (oben) sowie beim Senden mit Element 2 und Empfangen mit Element 3 (unten). Während bei dem ersten Signal nur die zwei Rückwändechos zu sehen sind, tritt bei dem zweiten Signal ein deutliches Echo bei $33,6 \mu\text{s}$ auf, welches der Transversalwelle zugeordnet werden kann. Aus der Probendicke, der Longitudinalwellengeschwindigkeit sowie der Laufzeit zwischen dem (ersten) Rückwändecho der Longitudinalwelle und dem Echo der Transversalwelle kann die Transversalwellengeschwindigkeit bestimmt werden [7].

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Anwendbarkeit eines Verfahrens auf der Basis von Annular Arrays zur simultanen Bestimmung von Schichtdicke und Schallgeschwindigkeit zweischichtiger Systeme bei nur einseitiger Zugänglichkeit für die Materialcharakterisierung diskutiert. Der Schwerpunkt lag auf der Validierung des Fokussierungsverfahrens für die Bestimmung von Schichtdicke und Longitudinalwellengeschwindigkeit in einer zweiten Schicht. Zudem wurde gezeigt, dass sich mit den verwendeten Annular-Arrays auch die Transversalwellengeschwindigkeit bestimmen lässt.

Während das Fokussierungsverfahren gute Ergebnisse für die Stahlplatten liefert, zeigen sich bei den Aluminium-

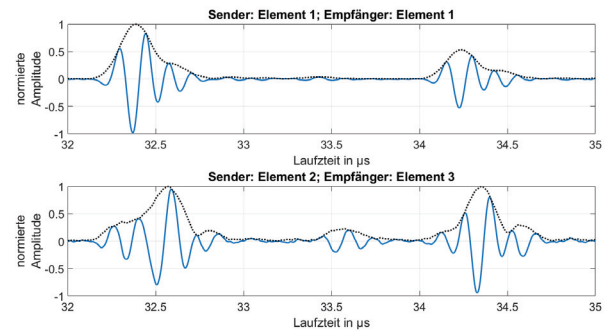


Abbildung 5: Durch die schrägen Laufwege findet bei einigen Elementkombinationen Modenkonzersion an der Rückwand der untersuchten Proben statt, welche zur Bestimmung der Transversalwellengeschwindigkeit genutzt werden kann.

platten deutliche Abweichungen. Die Ursache dieser Abweichungen wird in der Textur oder möglichen Eigenspannungen vermutet. Die Ringelemente der verwendeten Annular-Arrays sind in Viertelsegmente unterteilt. Diese können zukünftig genutzt werden um die Schalllaufzeiten durch die Proben und somit die Schallgeschwindigkeit richtungsabhängig zu bestimmen, um daraus Rückschlüsse auf Textur oder Eigenspannungen zu ziehen.

Literatur

- [1] Dayal, V.: An Automated Simultaneous Measurement of Thickness and Wave Velocity by Ultrasound. *Exp. Mech.* 32:3 (1992), 197-202
- [2] Kümmritz, S.; Wolf, M.; Kühnicke, E.: Simultaneous determination of thicknesses and sound velocities of layered structures. *tm* 82:3 (2015), 127-134
- [3] Hsu, D. K.; Hughes, M. S.: Simultaneous ultrasonic velocity and sample thickness measurement and application in composites. *J. Acoust. Soc. Am.* 92:2 (1992), 669-675
- [4] Kim, Y. H.; Song, S.-J.; Lee, J.-K.: Simultaneous measurements of the ultrasonic wave velocity and thickness of a solid plate made from one side of the plate. *Meas. Sci. Technol.* 14 (2003), pp. 13-16
- [5] ONDA, Tables of Acoustic Properties of Materials (Stand 13.03.2017), URL:
- [6] Clark, A. V.; Reno, R. C.; Thompson, R. B.; Smith, J. F.; Blessing, G. V.; Fields, R. J.; Delsanto, P. P.; Mignogna, R. B.: Texture monitoring in aluminium alloys: a comparison of ultrasonic and neutron diffraction measurement. *Ultrasonics*, 26 (1988)
- [7] Kümmritz, S.; Wolf, M.; Kühnicke, E.: Material Characterisation of Layered Structures by the Simultaneous Determination of Sound Velocity and Thickness. *Physics Procedia* 70 (2015), 330-333 http://www.ondacorp.com/tecref_acoustictable.shtml