

Ultraschallmodellierung und SAFT-Rekonstruktion von Fehlstellen in Holzbauteilen

Prashanth Kumar CHINTA^{*}, Klaus MAYER^{*}, Martin KRAUSE[†] * : Fachgebiet Theorie der Elektrotechnik und Photonik, Univesität Kassel, Wilhelmshöher Allee 71, Kassel † : BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, Berlin

Kurzfassung. Die zerstörungsfreie Prüfung von Holzbauteilen mit Ultraschall ist sehr anspruchsvoll wegen der sehr komplexen Mechanismen der Streuung von elastischen Wellen in diesen Materialien. Im vorliegenden Beitrag präsentieren wir die Rekonstruktion durch Abbildung von Fehlern in Bauteilen aus Fichte und Buche. Wir verwenden die Technik der Fokussierung durch synthetische Apertur im Zeitbereich (SAFT) zur Abbildung von Streuzentren in diesen Materialien. Die 2D Elastische Finite Integrationstechnik (EFIT) wird benutzt, um synthetische Daten in Form von B-Scans zu gewinnen. Außerdem bietet diese Technik die Möglichkeit, durch Visualisierung der Wellenarten die Ausbreitung in anisotropen Materialien besser zu verstehen. Die Möglichkeiten der Anregung verschiedener Wellentypen durch die Vorgabe von Prüfkopfmodellen wird genutzt, um die in der Praxis vorkommende unterschiedliche Orientierung von Faserrichtung und Wachstumsringen optimal mit in die Auswertung einbringen zu können. Simulationen werden für verschiedene Streueranordnungen durchgeführt, um die Effekte von Auflösung, Wellenumwandlung und Vielfachstreuung voneinander trennen zu können. Zur SAFT - Rekonstruktion werden die Gruppengeschwindigkeiten der verschiedenen elastischen Moden (qP - Quasi-Druck, qS1 - Quasi-Scher-1 und qS2 - Quasi-Scher-2) für die Rückfokussierung herangezogen. Die Rekonstruktionsergebnisse für akustisch anisotrope Medien - hier Holz - werden mit Rekonstruktionen unter der Annahme von isotropen Materialeigenschaften verglichen. Wegen der starken Abweichung der Gruppengeschwindigkeiten in anisotropem Holz gegenüber isotropen Materialien, ist die Verbesserung der Abbildungsqualität mit der vorgestellten Methode teilweise erheblich. Aktuelle vergleichende Ergebnisse mit experimentellen Anordnungen sollen vorgestellt werden.

Einleitung

Bei der Zerstörungsfreien Prüfung von Objekten ist es wichtig die elastische Theorie der Ausbreitung von Wellen in dem jeweiligen Material zu verstehen. Obwohl es sich häufig um ein Kontinuum handelt, spricht man von der Teilchenbewegen, der Bewegung von infinitesimalen Zellen und von deren elastischen Eigenschaften. Die effektive Teilchenbewegung hängt von den einwirkenden Kräften, von der Art der Krafteinwirkung und von den Materialeigenschaften ab. Die elastische Wellenausbreitung in einem Verbundwerkstoff wie Holz ist sehr komplex und wird auf die elastischen Eigenschaften von Kristallen projiziert. Wobei die Kristallstruktur von der Art des Holzes und von der Lage im Holz variiert. Man nimmt jedoch an, dass die Materialeigenschaften eines relativ kleinen Holzstückes,



aus einem homogenen Holzstamm geschnitten bezogen auf die Materialeigenschaften als relativ konsistent betrachtet werden kann.

Bauwerke aus Holz, wie Holzbrücken, alte Gebäude oder Holzwindmühlen erfahren eine starke Veränderung im Laufe ihrer Lebenszeit, abhängig von den Umgebungsbedingungen unter denen sie sich befinden. Die Einflüsse können zu Ausbildung von Fehlstellen, wie z.B. Wurmlöcher (verursacht durch Insekten) und zu Delaminationen von Holzverklebungen führen, welche die Tauglichkeit des Systems gefährden oder das System selbst zerstören können. Diese Fehlstellen müssen detektiert werden um die Systems zu retten.

Die Ausbreitung elastische Wellen und Streueffekte können durch numerische Modellierung effizient untersucht werden. Defekte können durch Rekonstruktionsalgorithmen, die die Eigenschaften von elastischen Wellen berücksichtigen, identifiziert werden. Die Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) [1] ist ein numerisches Tool, welches für die Zerstörungsfreie Prüfung von inhomogenen isotropen und anisotropen Materialien entwickelt wurde. Die Rekonstruktionstechnik, die in diesem Paper vorgestellt wird, ist eine Abwandlung der konventionellen Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) [2]. Es wird ein Vergleich zwischen der isotropen und der anisotropen Technik durchgeführt. Der Artikel stellt auch eine neue Technik vor, die basierend auf SAFT mit zusätzlicher Rückausbreitung des Wellenfeldes zur Rekonstruktion von Fehlstellen in inhomogenen Medien durchführt.

Im Abschnitt 1 wird die zugrundeliegende Theorie der elastischen Wellen in Festkörpern vorgestellt. Abschnitt 2 stellt den Aufbau von Holz und die Geschwindigkeitsdiagramme für die Analyse mit ebenen Wellen da. Abschnitt 3 präsentiert die Ergebnisse der Modellierung und der Rekonstruktion in homogenen anisotropen massiven Holzbauteilen. Abschnitt 4 führt die neue Technik von SAFT ein, die die Geometrieinformation des Bauteils nutzen kann. Abschnitt 5 skizziert einige Schlussfolgerungen zu den Rekonstruktionsergebnissen und diskutiert mögliche zukünftige Aufgaben.

1. Zugrundeliegende Theorie der elastischen Wellenausbreitung in Festkörpern

Die Basisgleichungen der Elastodynamik bestehen aus der Newton-Cauchy Gleichung (Gl. 1) und der Deformationsratengleichung (Gl. 2). Eine Umstellung der Gleichungen unter Benutzung von Materialgleichungen (Impuls-Teilchengeschwindigkeits-Relation und verallgemeinertes Hookesches Gesetz [3])

$$\frac{\partial \underline{\mathbf{j}}(\underline{\mathbf{R}},t)}{\partial t} = \nabla \Box \underline{\underline{\mathbf{T}}}(\underline{\mathbf{R}},t) + \underline{\mathbf{f}}(\underline{\mathbf{R}},t)$$
(1)

$$\frac{\partial \underline{\underline{\mathbf{S}}}(\underline{\mathbf{R}},t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \left\{ \nabla \underline{\mathbf{v}}(\underline{\mathbf{R}},t) + \left[\nabla \underline{\mathbf{v}}(\underline{\mathbf{R}},t) \right]^{21} \right\} + \underline{\underline{\mathbf{h}}}(\underline{\mathbf{R}},t)$$
(2)

führen uns zu den sogenannten Navier Gleichungen (Gl. 3). Im homogenen Fall führt uns die Einsetzung von harmonischen ebenen Wellen für den Teilchenverschiebungsvektor zu der Kelvin-Christoffel Gleichung (Gl. 4), die uns ein Eigenwertproblem definiert. Die Lösung dieses Eigenwertproblems, durch die Verwendung der Charakteristischen Gleichung ($\underline{\mathbf{w}}(\underline{\mathbf{k}},\omega) = \underline{\mathbf{0}}$), liefert uns die Phasengeschwindigkeiten (c_{ph}) von drei verschiedenen orthogonalen Moden und ihre zugehörige Polarisation. Die Gruppengeschwindigkeit wird aus der Dispersionsrelation bestimmt (s. Gl. 5) [4,5].

$$\rho(\underline{\mathbf{R}}) \frac{\partial \underline{}^{2} \underline{\mathbf{v}}(\underline{\mathbf{R}}, t)}{\partial t^{2}} = \nabla \Box_{\underline{\mathbf{c}}}(\underline{\mathbf{R}}) : \nabla \underline{\mathbf{v}}(\underline{\mathbf{R}}, t) + \frac{\partial \underline{\mathbf{f}}(\underline{\mathbf{R}}, t)}{\partial t}$$
(3)

$$(\underbrace{\underline{\hat{k}}}_{\underline{\underline{c}}} \Box \underline{\underline{c}}_{ph} \Box \underline{\hat{k}} - \rho c_{ph}^{2} (\underline{\hat{k}}) \underline{\underline{I}}) \Box \underline{\hat{u}} (\underline{\hat{k}}) = \underline{0}$$

$$(4)$$

$$\underline{\mathbf{c}}_{\mathrm{gr}}(\underline{\hat{\mathbf{k}}}) = \frac{\partial \omega}{\partial \underline{\mathbf{k}}}$$
(5)

Das Modellierungswerkzeug EFIT basiert auf den Integralgleichungen der Elastodynamik (Gl. 6 und Gl. 7). Wie in Gleichung 1 und 2 sind der Kraftdichtenvektor $\underline{\mathbf{f}}(\underline{\mathbf{R}},t)$ und der induzierte Deformationsratentensor $\underline{\mathbf{h}}(\underline{\mathbf{R}},t)$ jeweils die Quellterme. EFIT benutzt ein duales orthogonales Gittersystem und verwendet die "marching on in time" Methode [6] wobei der Geschwindigkeitsvektor ($\underline{\mathbf{v}}(\underline{\mathbf{R}},t)$) und der elastische Spannungstensor ($\underline{\underline{\mathbf{T}}}(\underline{\mathbf{R}},t)$) in einer "leapfrog" Technik berechnet werden. Die räumliche und zeitliche Diskretisierung wird unter Berücksichtung von Stabilitätsbedingungen für EFIT durchgeführt und in die 3D EFIT Simulationssoftware eingespeist. Die Materialparameter – Massendichte ($\rho(\underline{\mathbf{R}})$) und Nachgiebigkeitstensor ($\underline{\underline{\mathbf{s}}}(\underline{\mathbf{R}})$) bestimmen die Materialeigenschaften und führen zu den verschiedenen elastischen Wellenmoden im Material

schiedenen elastischen Wellenmoden im Material.

$$\iiint_{V} \rho(\underline{\mathbf{R}}) \frac{\partial}{\partial t} \underline{\mathbf{v}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \, \mathrm{d}V = \iiint_{S=\partial V} \underline{\mathbf{n}} \Box \underline{\underline{\mathbf{T}}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \, \mathrm{d}S + \iiint_{V} \underline{\mathbf{f}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \, \mathrm{d}V \tag{6}$$

$$\iiint_{V \equiv \underline{\underline{S}}} (\underline{\mathbf{R}}) : \frac{\partial}{\partial t} \underline{\underline{T}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \, \mathrm{d}V = \iiint_{S = \partial V} \operatorname{sym}\{\underline{\mathbf{n}}\underline{\mathbf{v}}(\underline{\mathbf{R}}, t)\} \, \mathrm{d}S + \iiint_{V} \underline{\underline{\mathbf{h}}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \, \mathrm{d}V \tag{7}$$

2. Der strukturelle Aufbau von Holz und die Gruppengeschwindigkeit

Der strukturelle Aufbau von Holz [7] mit den Definitionen von Ebenen ist in Bild 1 wiedergegeben. Im Allgemeinen ist die Massendichte des inneren Teils (Kernholz) höher als im äußeren Teil (Splintholz). Jedoch kann die Massendichte eines Holzstückes, das von



Abbildung 1: a) Struktureller Aufbau von Holz. b) Steifigkeitstensor und Massendichte von Fichtenholz [8].

einem dicken Holzstamm geschnitten wurde als konstant angesehen werden. Das Splintholz spielt beim Baum eine vitale Rolle für den Transport und die Speicherung von Wasser und Nährstoffen wohingegen der innere Teil nicht für diese Aufgaben von Bedeutung ist. Die Fasern des Holzes sind in Wachstumsrichtung des Baumes orientiert. Die Fasern dienen primär zum Transport von Wasser und Mineralien von den Wurzeln des Baumes. Jahresringe geben uns Informationen über das Alter des Baumes. Eine große Gruppe von Baumarten verhalten sich wie orthotrope Kristalle mit neun unabhängigen elastischen Steifigkeitskonstanten und zeigt eine ausgeprägte Anisotropie. Die Slowness- und die Gruppengeschwindigkeitsdiagramme von Fichtenholz in verschiedenen Schnittebenen sind in Bild 2 dargestellt. Die Gruppengeschwindigkeitsprofile werden für die Rekonstruktion des anisotropen Zeitbereichs-SAFT verwendet. Abbildungen 2 und 3 bestehen aus den Slownessund Gruppengeschwindigkeitsdiagrammen in Kristallebenen eines anisotropen Fichtenholz-Testblocks. Aus den Slowness und Gruppengeschwindigkeitsdiagrammen ist ersichtlich, dass die Quasidruckwelle (qP) sich sehr schnell in die Richtung der Faserorientierung ausbreitet. Die qS1 und qS2 (Quasi-Scher-)Moden breiten sich hingegen nur sehr langsam in Faserrichtung aus. Basierend auf den Polarisationsberechnungen für jede Ebene (aus Gl. 4) erhalten wir Quasidruckwellen (qL), Quasischerwellen (qS) und eine reine Transversalwelle (T).



Abbildung 2: Slowness-Diagramme für verschiedene Kristallebenen von Fichtenholz. Links: Slowness im radialen Schnitt. Mitte: Slowness im longitudinalen Schnitt. Rechts: Slowness in transversalen Schnitt.



Abbildung 3: Gruppengeschwindigkeiten in den Kristallebenen von Fichtenholz. Links: Gruppengeschwindigkeit im radialen Schnitt. Mitte: Gruppengeschwindigkeit im longitudinalen Schnitt. Rechts: Gruppengeschwindigkeit im transversalen Schnitt.

3. Ultraschall Modellierung und Rekonstruktion in homogenem Medium

In folgenden Abschnitt werden die Modellierung der Wellenausbreitung und die Abbildung von Fehlstellen in Fichtenholz präsentiert. Die Steifigkeit und die volumetrische Massendichte hierzu sind in Bild 1b aufgelistet. 2D-EFIT Simulationen werden benutzt, um synthetische A- und B-Scans für Impuls/Echo Experimente zu erzeugen. Es sind die Ergebnisse von 2D-EFIT Simulationen und die Fehlerabbildungen für verschiedene Anregungen (bezogen auf die Faserorientierung des Holzes) dargestellt.

3.1 2D-EFIT Simulation and Fehlerabbildung in der TL-Ebene

Die 2D-EFIT Simulation ist für den Fall eines homogenen Mediums mit einem kreisförmigen Dirichlet Streuer durchgeführt. Eine Druckwellenanregung in vertikale Richtung, d.h. parallel zur Faserrichtung ist vorgegeben. Bild 4 zeigt eine Momentanaufnahme der elastischen Wellenausbreitung in der TL-Ebene. Aus dem Bild wird offensichtlich, dass die qP Welle sich sehr schnell ausbreitet und durch die Fehlstelle reflektiert wird, außerdem werden synthetische B-Scans aufgezeichnet (Bild 5a).



Abbildung 4: 2D-EFIT Momentanaufnahmen der elastischen Wellenausbreitung in der LT-Ebene (xz-Ebene: die z-Achse korrespondiert mit der Tangentialachse (T) und die x-Achse mit der Longitudinalachse (L), die durch die Wachstumsrichtung der Fasern bestimmt ist.

Vergleicht man die Fehlerabbildung mit isotropem SAFT unter der Annahme einer richtungsunabhängigen Geschwindigkeit von 5200 m/s mit der Rekonstruktion unter der Verwendung einer anisotropen qP Welle, so ergibt sich ein gravierender Unterschied im Ergebnis. Ein halbkreisförmiges Laufzeitprofil (Bild 5b links) ist für die SAFT Rekonstruktion in Bild 5b (rechts) benutzt, wohingegen das Laufzeitprofil aus Bild 5d (links) für die anisotrope SAFT Rekonstruktion in Bild 5f (rechts) verwendet wurde. Die Rekonstruktion des Streuers ergibt nur durch die Annahme einer anisotropen Wellenausbreitung ein fokussiertes Bild.



Abbildung 5: Rekonstruktion eines Streuers. a) 2D-EFIT synthetische Daten. b) Links: Laufzeitprofil benutzt zur isotropen SAFT Rekonstruktion. Rechts: isotrope SAFT Rekonstruktion. b) Gruppengeschwindigkeit benutzt für die anisotrope SAFT Rekonstruktion. d) Links: Laufzeitprofil benutzt für die anisotrope SAFT Rekonstruktion. Rechts: Ergebnis der anisotropen SAFT Rekonstruktion.

3.2 2D-EFIT Simulation and Fehlerabbildung in der LT-Ebene

Die Wellenausbreitung in der LT-Ebene in Fichtenholz ist dargestellt. Die Anordnung besteht aus einer Reihe kreisförmiger Dirichlet Streuer (Fehlstellen) mit jeweils variierendem Abstand. Es wird eine vertikale Anregung (d.h. senkrecht zum Faserverlauf) gewählt. 2D-EFIT Momentanaufnahmen im Zeitbereich sind in Bild 6 wiedergegeben. Man erkennt, dass ein großer Teil der Energie der qS1 Welle durch die Inhomogenitäten reflektiert wird.



Abbildung 6: 2D-EFIT Momentanaufnahmen der elastischen Wellenausbreitung in der LT-Ebene (xz-Ebene: die z-Achse korrespondiert mit der Tangentialachse (T) und die x-Achse mit der Longitudinalachse (L), die durch die Wachstumsrichtung der Fasern bestimmt ist.



Abbildung 7: Rekonstruktion der Fehlstellen. a) 2D-EFIT synthetische Daten. b) Links: Laufzeitprofil benutzt für die isotrope SAFT Rekonstruktion. Rechts: Isotrope SAFT Rekonstruktion mit einer Geschwindigkeit von 1050 m/s. c) Gruppengeschwindigkeit für die anisotrope SAFT Rekonstruktion. d) Links: Ausgewähltes Laufzeitprofil für die anisotrope SAFT Rekonstruktion. Rechts: Ergebnis der anisotropen SAFT Rekonstruktion.

Mit Hilfe der EFIT Simulation werden Daten eines Impuls/Echo Experiments gewonnen (Fig. 7a), die für die Fehlerrekonstruktion verwendet werden. Zur isotropen SAFT Rekonstruktion ist eine Geschwindigkeit von 1050 m/s verwendet. Die A-Scans der Messfläche werden mit kreisförmigem Laufzeitprofil (Bild 7b links) in das Medium hineingerechnet. Das Ergebnis ist in Bild 7b (rechts) dargestellt. Für die anisotrope SAFT Rekonstruktion wird der rot eingefärbte Teil der qS1 Gruppengeschwindigkeit (Bild 7b) verwendet. Das für

einen Zeitpunkt in das Material gerechnete Laufzeitprofil ist in Bild 7d (links) dargestellt. Mit isotropem SAFT ist eine Fokussierung der Fehlstellen nicht erreichbar, wohingegen mit der anisotropen SAFT Rekonstruktion alle Fehlstellen an ihren exakten Positionen erscheinen (Bild 7d rechts).

4. Ultraschall Modellierung und Rekonstruktion in inhomogenen isotropen Medien

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse einer Technik präsentiert, die die konventionelle SAFT Technik verknüpft mit der Rückausbreitung des Wellenfeldes auf Zwischenschichten im Rekonstruktionsgebiet. Im Allgemeinen werden größere Holzstrukturen durch Verklebung von kleineren Holzbalken oder –brettern gewonnen (ähnlich der Geometrie, die in Bild 8 gezeigt ist). Jede kleinere Einheit hat ihre eigene Kristallorientierung und daher ihr eigenes Geschwindigkeitsprofil. Eine Fehlerabbildung in solch einem System ist wegen des sehr hohen Grades an Inhomogenität sehr kompliziert. Ein erster Ansatz eines ähnli-



Abbildung 8: 2D-EFIT Momentanaufnahmen der elastischen Wellenausbreitung. Bild ganz links: Geometrie mit Materialangaben wie sie für die Simulation verwendet wurde.

chen Szenarios, jedoch mit isotropen Materialien ist hier beschrieben. Die Geometrie besteht aus verschiedenen Blöcken mit verschiedenen Materialeigenschaften, d.h. mit verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Die Geometrie enthält außerdem Streuer mit idealer Direchlet Randbedingung (z.B. Fehlstellen mit Luft gefüllt). Die Anordnung zusammen mit den Geschwindigkeitsparametern ist im Bild 8. (ganz links) dargestellt.



Abbildung 9: Rekonstruktion von Fehlstellen in inhomogenen anisotropen Medien. a) 2D-EFIT synthetische Daten eines Impuls-Echo Experiments. b) Rekonstruktion mit konventionellem SAFT mit einer Geschwindigkeitsannahme von 1900 m/s. c) Rekonstruktion mit SAFT und Rückausbreitung der A-Scans auf die Grenzflächen.

Die elastische Wellenausbreitung in dieser Geometrie ist wiederum mit 2D-EFIT simuliert. Momentanaufnahmen des Wellenfeldes sind in Bild 8 wiedergegeben. Das durch vielfache Simulation gewonnene synthetische B-Bild ist mit logarithmischer Skalierung in Bild 9a gezeigt. Bild 9b zeigt die Abbildung der Fehlstellen mittels homogen-isotropem SAFT. Der Rekonstruktionsalgorithmus verwendet eine Druckwellengeschwindigkeit von 1900 m/s. Als Folgerung davon ist nur der Streuer in dem gelb eingefärbten Gebiet richtig fokussiert. Alle übrigen Streuer sind wegen der fehlangepassten Geschwindigkeit in falscher Tiefe und defokussiert abgebildet. Bild 9c gibt die Rekonstruktion mit dem neuen Ansatz wieder. Diese Methode benutzt die Kenntnis der Geometrie und verwendet die Geschwindigkeit der verschiedenen Regionen für die Rekonstruktion.

Mit dieser Methode werden A-Scans auf jedem Rand eines Gebietes durch Rückausbreitung von den Rändern des darüberliegenden Gebiets gewonnen. Diese "synthetischen" A-Scans werden dann in das darunterliegende Gebiet mit dem isotropen oder anisotropen SAFT weiterverarbeitet. Mit dieser Technik erreichen wir eine sehr gute Fokussierung der Fehlstellen, der Rückwand (RW) und der Trennfläche (TF) zwischen den Gebieten.

5. Zusammenfassung

Mit Hilfe von Simulationstechniken wurden die anisotropen Eigenschaften von Holz und der Einfluss auf die Wellenausbreitung untersucht. Die Effekte der Anregung im Bezug auf die Faserrichtung wurden simuliert. Die Anwendung von konventioneller SAFT Technik für die Abbildung von Fehlstellen in homogenen isotropen Medien wurde verglichen mit der Verwendung einer anisotropen Variante von SAFT, die zu einer wesentlichen Verbesserung der Abbildungseigenschaften führt. Die anisotrope SAFT Technik benutzt die Gruppengeschwindigkeitsprofile, die durch Lösung des beschriebenen Eigenwertproblems gewonnen werden, als Laufzeitprofil bei der Abbildung. Die anisotrope Technik ist in der Lage alle angenommenen Fehlstellen (Inhomogenitäten) in homogen-anisotropem Holz korrekt abzubilden. Eine neue Technik basierend auf SAFT in Verbindung mit der Rückausbreitung in isotropen und anisotropen Medien wurde in Abschnitt 4 vorgestellt. Ergebnisse mit isotropen, jedoch stark unterschiedlichen Materialien zeigen eine gute Lokalisierung von Fehlstellen und Geometrieanzeigen wie Trennflächen und Rückwände. Die gleiche Methode ist auf anisotrope Materialien anwendbar.

Danksagung: Die Autoren möchten Prof. Karl-Jörg Langenberg, and Priv.-Doz. Dr.-Ing. René Marklein für ihre Unterstützung danken.

Referenzen

[1] Marklein, R. [1997]: Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblem im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik, Shaker Verlag, Aachen, Germany.

[2] Mayer, K. [1990]: Ultraschallabbidungsverfahren: Algorithmen, Methoden der Signalverarbeitung und Realisierung, Unveristat Kassel, Kassel, Germany.

[3] Langenberg, K. J., R. Marklein, K. Mayer [2009]: *Theoretische Grundlagen der zerstörungsfrein Materialprüfung mit Ultraschall*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München Germany, 2009.

[4] Fellinger, P., R. Marklein, K. J. Langenberg, S. Klaholz [1995]: Numerical modelling of elastic wave propagation and scattering with EFIT - elastodynamic finite integration technique, Wave Motion 21 47-46.

[5] Newmann, E. und 4 mitautoren [1995]: Ultraschallprüfung von austenitischen Plattierungen,

Mischnähten und austenitischen Schweissnähten, 2nd Edition, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, Germany.

[6] Musgrave, M.J.P. [1970]: Crystal Acoustics, Introduction to the study of elastic waves and vibrations in crystals, Holden-Day, San Fancisco, USA.

[7] Bucur, V. [2006]: Acoustics of Wood, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.

[8] Bucur, V., Lanceleur. P, Roge B [2002]: Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surfaces, Ultrasonics 40(2002) 537-541.