

3D-SAFT Imaging von Streuern in Brettschichtholz

Martin KRAUSE, Ute EFFNER, Sabine MÜLLER, Thomas NOWAK, Dirk VERGIN
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 12200 Berlin
martin.krause@bam.de

Klaus MAYER, Prashant K. CHINTA
Universität Kassel, 34121 Kassel
kmayer@uni-kassel.de

Kurzfassung. Aktuell wird die Ultraschallechotechnik für Holzbauteile genutzt, indem aus der Abschattung eines ansonsten stabilen Rückwandechos auf Auffälligkeiten im Holzbauteil geschlossen wird. Dabei werden Transversalwellen (Mittelfrequenz 50 kHz) mit der Polarisationsrichtung in Faserrichtung (L) angewendet. In einem 2012 abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurde nun die direkte Abbildung von Streuern durch anisotrope SAFT-Rekonstruktion entwickelt. Dazu werden flächig aufgenommene Ultraschallmessdaten mit automatisiert scannenden Druck- und Scherwellenköpfen erzeugt und auf Basis anisotroper Geschwindigkeitsverteilungen rekonstruiert. Benutzt werden die auch häufig für Beton eingesetzten trocken ankoppelnden Punktkontakt-Prüfköpfe. Da damit auch intensive Wellen an der Oberfläche erzeugt werden, entstehen im Material zusätzliche Kopfwellen, die ebenfalls bei der Rekonstruktion berücksichtigt werden. Da die Wellengeschwindigkeiten in Holz individuell stark schwanken, wird eine interaktive Auswertetechnik zur Ermittlung der Materialkonstanten benutzt. Für die Messungen werden Druckwellen sowie Scherwellen in zwei Polarisationsrichtungen verwendet. Die Messungen erfolgen sowohl mit automatischen Scannersystemen als auch mit einem linearen Prüfkopf-Array (kommerziell erhältlicher multistatischer Messkopf). Gezeigt werden Ergebnisse an Bauteilen mit künstlichen und realen Fehlstellen. Das Forschungsprojekt wurde gefördert vom Bundesamt für Bau- und Raumordnung (BBR, Zukunft Bau).

1 Einführung

Bildgebende Ultraschallecho-Verfahren im Frequenzbereich von 50 bis 150 kHz mit 3D-Rekonstruktionsrechnung haben für die zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen inzwischen einen hohen Leistungsstand erreicht [1], [2]. Im vorliegenden Beitrag werden Ansätze beschreiben, diese Abbildungsverfahren auf Bauteile aus modernen Holzprodukten, insbesondere Brettschichtholz zu übertragen. Insbesondere Brettschichtholz wird inzwischen zunehmend für Ingenieurbauwerke und Konstruktionen mit großen Tragweiten genutzt.

Aufgrund immer wieder auftretender Schadensfälle an Holzbauteilen im Außeneinsatz, teilweise begünstigt durch Vernachlässigung des konstruktiven Holzschutzes, ergibt sich für Holzkonstruktionen im Bestand ein regelmäßiger Prüfbedarf. Bisher wird dafür auch ein Ultraschallechoverfahren eingesetzt, das über die Abschattung



des Rückwandechos auf auffällige Bereiche hinweist [3], [4], [5]. Eine Verbesserung der zerstörungsfreien Prüfung und der Qualitätssicherung der Bauausführung soll helfen, die Nutzung von modernen Holzprodukten für Ingenieurbauwerke weiter zu intensivieren. Dies hat wegen der Bedeutung von Holz als nachwachsendem Rohstoff und natürlichem Kohlenstoffspeicher einen zukunftsweisenden Aspekt mit klimapolitischer Bedeutung.

Inhaltlich besteht die wesentliche Aufgabe bei der Entwicklung eines bildgebenden Ultraschallecho-Verfahrens für Holzbauteile in der Berücksichtigung der anisotropen Ultraschallausbreitung im Holz.

Mit einem in den Jahren 2010 bis 2012 von den Autoren durchgeführten Forschungsvorhaben sollte herausgefunden werden, inwieweit sich diese Nutzung der Ultraschalltechnik im Niederfrequenzbereich (50 bis 100 kHz) sinnvoll auf die Qualitätssicherung von modernen Holzprodukten übertragen lässt [6]. Dieser Beitrag fasst, anschließend an [7], Teilergebnisse dieses Forschungsvorhabens zusammen.

2 Ansatz und Bemerkungen zu den theoretischen Grundlagen

Grundlage für die Anwendung der Ultraschallechotechnik ist die Ausbreitung elastischer Wellen in Holz unter Berücksichtigung der anisotropen Struktur. Für die Echotechnik in Brettschichtholz wird dabei zunächst davon ausgegangen, dass das Material homogen anisotrop ist, das heißt, dass die Lamellen des Holzes einen möglichst geringen Anteil an gekrümmten Jahresringen enthalten. Dann sind, wie in Bild 1 und Bild 2 gezeigt, die drei Symmetrieachsen **Longitudinal (L, entlang der Faserrichtung)**, **Radial (R, senkrecht zu den Jahresringen)** und **Tangential (T, tangential zu den Jahresringen)** zu berücksichtigen, die Symmetrie bleibt aber weitgehend konstant.



Bild 1 Symmetrieachsen in orthotropem Holz Longitudinal **L** (Faserrichtung), Radial **R**, Tangential **T**.



Bild 2 Aus 3 x 12 Holzquadern gelemter Probekörper mit weitgehend homogener anisotroper Struktur (hier: Buchenholz).

Die Beschreibung der Ausbreitung elastischer Wellen in anisotropen Materialien basiert auf der Lösung der elastodynamischen Bewegungsgleichungen und der Berücksichtigung des Hook'schen Gesetzes. Generell breiten sich in einem anisotropen Festkörper drei Wellenmoden mit richtungsabhängiger Geschwindigkeit aus, die üblicherweise als quasi-Druckwelle (qP) und quasi-Scherwellen (qS1 und qS2) bezeichnet werden. Das „quasi“ deutet an, dass die Polarisation der Schwingung außerhalb der Symmetrieachsen nicht unbedingt in Ausbreitungsrichtung (für die p-Welle) und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (für die Scherwellenmoden) orientiert ist.

Die Richtungsabhängigkeit der Geschwindigkeiten wird häufig in Slownesdiagrammen dargestellt (siehe z. B. Bucur [8]). Anschaulicher für die Ausbreitung von Ultraschallimpulsen sind aber die Gruppengeschwindigkeiten und deren Richtungsabhängigkeit, die sich ebenfalls aus den erwähnten Grundgleichungen ergeben [9].

Entscheidend bei einer Ultraschallmessung ist nun, welche Wellenmoden mit welcher Amplitude (Einhüllende des Schalldrucks) in Abhängigkeit von der Art der Ultraschallprüfköpfe und der Richtung angeregt und reflektiert werden. Aus diesem Grund

wurden die Ausbreitung und Reflexion/Streuung der Wellenimpulse mit der EFIT Methode berechnet und verschiedene Mess-Szenarien visualisiert (EFIT: Elastodynamische Finite Integrationstechnik [10]).

Bild 3 zeigt ein Beispiel für die Wellenausbreitung in Fichtenholz unter Verwendung der elastischen Konstanten gemäß Bucur [8]. Für eine punktförmige Anregung im Zentrum des Simulationsvolumens in vertikaler Richtung mit dem Zeitverlauf eines RC2-Pulses von 1 MHz (anklingender Kosinusimpuls mit 2 Zyklen) wurde der Feldverlauf mit 3D-EFIT berechnet.

Mithilfe dieser EFIT Simulation werden nun Daten eines Impuls/Echo Experiments gewonnen, das in Bild 3 dargestellt ist, nämlich die Wellenausbreitung in der LT-Ebene in Fichtenholz. Die Anordnung besteht aus einer Reihe kreisförmiger Dirichlet Streuer (Fehlstellen) mit variierendem Abstand.

Mithilfe der synthetischen Daten kann nun die Funktion des entwickelten anisotropen SAFT-Algorithmus getestet werden (SAFT: Synthetische Apertur Focusing Technique). Dies ist in Bild 4 und Bild 5 gezeigt, die [10] entnommen sind.

Für die anisotrope SAFT Rekonstruktion wird der durchgezogene Teil des Striches der qS1 Gruppengeschwindigkeit (Bild 4) verwendet. Das für einen Zeitpunkt in das Material gerechnete Laufzeitprofil ist in Bild 5 (links) dargestellt. Mit der anisotropen SAFT Rekonstruktion erscheinen dann alle Fehlstellen an ihren exakten Positionen.

Auf diese Weise wurde für verschiedene Anordnungen beispielhaft belegt, dass der entwickelte SAFT-Algorithmus sinnvoll funktioniert.

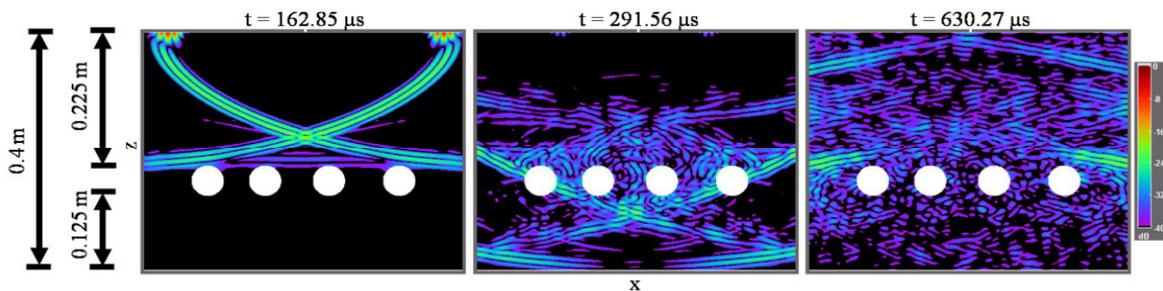


Bild 3 2D-EFIT Momentaufnahmen der elastischen Wellenausbreitung in der LT-Ebene (xz-Ebene: die z-Achse korrespondiert mit der Tangentialachse (T) und die x-Achse mit der Longitudinalachse (L), die durch die Wachstumsrichtung der Fasern bestimmt ist.

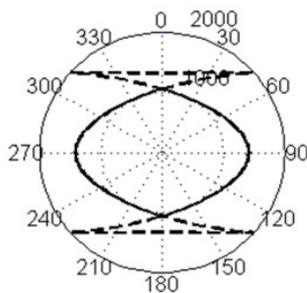


Bild 4 Gruppengeschwindigkeit für die anisotrope SAFT Rekonstruktion.

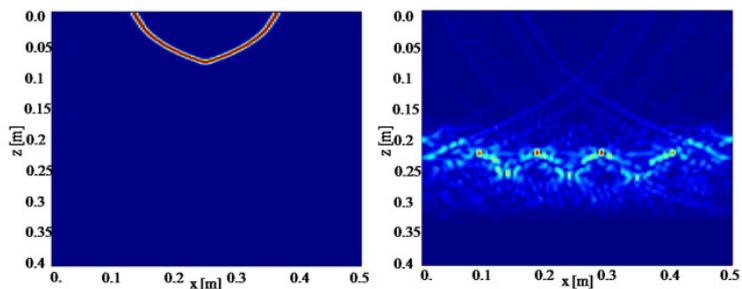


Bild 5 Links: Ausgewähltes Laufzeitprofil für die anisotrope SAFT-Rekonstruktion. Rechts: Ergebnis der anisotropen SAFT Rekonstruktion

3 Messtechnik und Probekörper

Für die Messungen wird die automatisierte Gerätetechnik mit Punktkontaktprüfköpfen im Frequenzbereich von 25 bis 100 kHz eingesetzt, wie sie sich für die zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen seit Jahren bewährt hat [2]. Als einziger Punkt kommt hinzu, dass zur Erreichung einer besseren Ortsauflösung die Prüfkopffzahl der Prüfköpfe von 12 Sendern + 12 Empfängern in den meisten Fällen auf 1+1 reduziert wurde. Bild 6 zeigt als Beispiel die Messung an einem Probekörper aus Fichtenholz. Der Prüfkopf wird über einen mit Saugfüßen befestigten Scanner Punkt für Punkt versetzt und die Ultraschalldaten über das Messinterface zum Ultraschallgerät A1220 aufgenommen. In den meisten Fällen wird allerdings eine Apparatur mit getrennter Sendeeinheit und PXI System auf der Messseite verwendet, um eine hohe Auflösung der Empfangsspannung zu erreichen.



Bild 6 Saugscanner mit Punktkontaktprüfkopf auf einem Probekörper aus Fichtenholz.

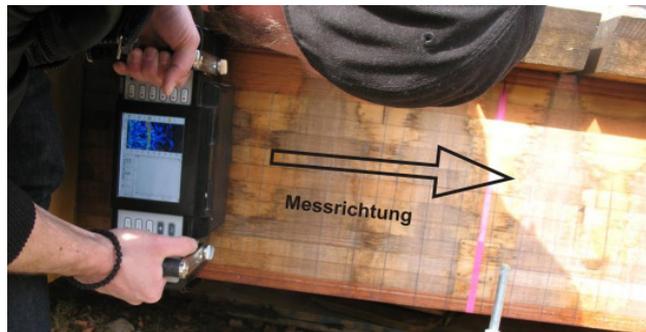


Bild 7 Messung mit dem Linearen Array (Scherwellen) an Fußgängerbrücke aus Sibirischer Lärche, Messrichtung ~ Polarisation ~ Faserrichtung L, (siehe Kapitel 4.2).

Zur schnellen Aufnahme der Messdaten für eine flächige Auswertung wird alternativ das Lineare Array A1040 (Acsys) [12] eingesetzt. Es erlaubt die unmittelbare Messung und SAFT-Auswertung an einer Position. Im Rahmen des Vorhabens wird daraus aus einer flächigen Messung mit der Forschungs- und Entwicklungssoftware InterSAFT ein 3D-Datensatz rekonstruiert und dargestellt.

4 Messergebnisse und Rekonstruktion

Nachfolgend werden zwei typische Beispiele von Messungen an einem Holzprobekörper und einer Fußgängerbrücke gezeigt und deren Auswertung mit InterSAFT zusammenfassend dargestellt. Weitere Einzelheiten können dem Forschungsbericht entnommen werden [6].

4.1 Unterdrückung der Oberflächenwellen und Reflektorortung in Kiefernholz

Bei verschiedenen Messreihen an Probekörpern mit einer Messfläche im Größenbereich von 50 cm * 50 cm stellte sich heraus, dass die an den Rändern der Messfläche reflektierten Wellen die Reflexionen von der Rückwand und aus dem Inneren der Probekörper häufig überlagern. Dies ist in Bild 8 am Beispiel der Messung an einem Probekörper aus Kiefernholz mit den Abmaßen 495 mm (L) x 301 mm (T) x 145 mm (R) gezeigt. An dem links dargestellten B-Bild aus der flächigen Scannermessung mit 1+1-Prüfköpfen ist zu erkennen, dass an den Seitenrändern der als Beispiel dargestellten x-Achse

(Symmetrierichtung L) jeweils drei Moden von Oberflächenwellen bzw. Raumwellen an der Oberfläche mit unterschiedlicher Geschwindigkeit reflektiert werden. Durch Mehrfachreflexionen entsteht dabei jeweils das charakteristische Bild eines Kreuzes, das für die rot dargestellte Mode zweifach sichtbar ist (entsprechend 4 Randreflexionen). Diese Moden kann man rechnerisch unterdrücken und es verbleibt damit das in Bild 8 (rechts) dargestellte B-Bild mit der deutlichen Anzeige einer Streuhyperbel (hellblau).

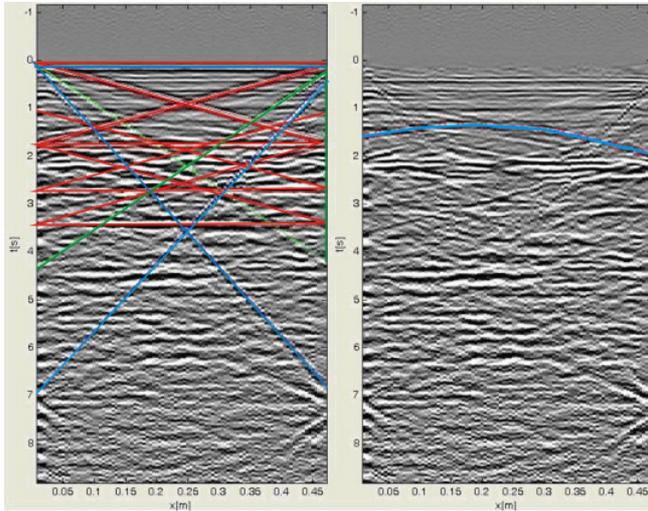


Bild 8 Typische Ultraschall-B-Bilder (Längsschnitt) entlang der L-Achse.
Links: Bestimmung der Wellen an der Oberfläche
Rechts: Anzeige der Streuhyperbel nach Unterdrückung der Wellen an der Oberfläche

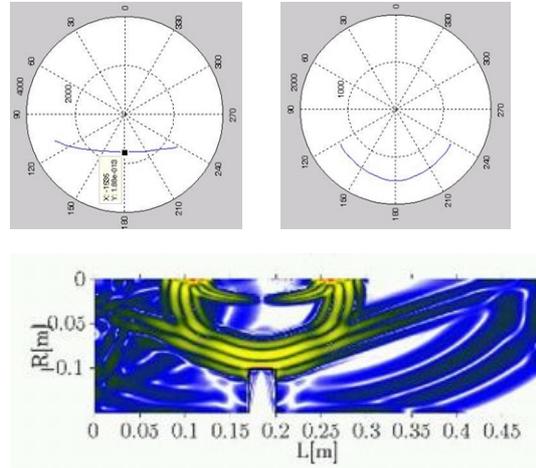


Bild 9 oben: Polardiagramm der Geschwindigkeiten in L- (links) und T-Richtung (rechts)
unten: qP und qS1 Welle, sowie die durch Modenkonversion angeregte Kopfwellen im Inneren von Kiefernholz (Momentaufnahme aus EFIT Modellierung).

Bei diesem Objekt handelt es sich um die Messung an einem Probkörper, der auf der Rückseite eine Flachbodenbohrung und einen eingefrästen Testreflektor (L-förmig) enthält (Bild 10). Das B-Bild in Bild 8 ist über letzterem aufgenommen.

Aus der Krümmung der Reflexionshyperbel in L- und T-Richtung ergeben sich die in Bild 9 (oben) dargestellten Polardiagramme für die relevante Gruppengeschwindigkeit. Führt man die 3D-SAFT Rekonstruktion mit diesen Geschwindigkeitsfunktionen aus, lässt sich der eingefräste Reflektor orts- und symmetriegenau abbilden (Bild 11). Eine solche scharf rekonstruierte Abbildung lässt sich mit den Gruppengeschwindigkeitskurven, die man aus den elastischen Materialparametern von Kiefernholz erhält, nicht erreichen. Die Erklärung liegt darin, dass die Druckwelle an der Oberfläche durch Modenkonversion eine schräg verlaufende Kopfwellen anregt, wie sich mit einer EFIT-Modellierung veranschaulichen lässt (typische Momentaufnahme dargestellt in Bild 9). Zu der Abbildung trägt in diesem Fall also sowohl die qS1-Welle als auch die Kopfwellen bei.

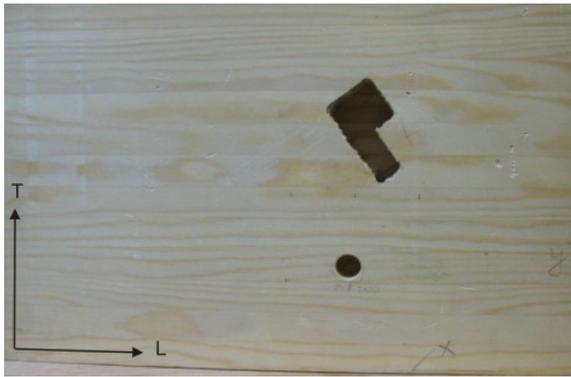


Bild 10 Probekörper aus weitgehend homogen anisotrop geleimten Kiefernholz mit einer L-förmig geformten, von der Rückseite eingefrästen, Fehlstelle.

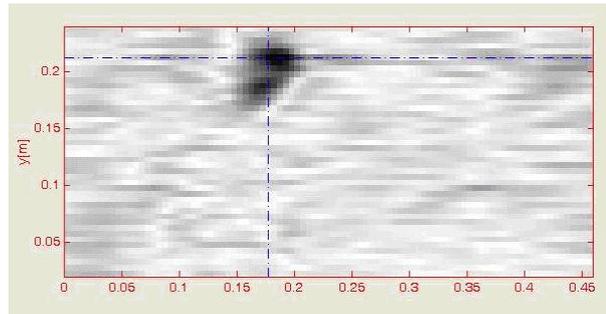


Bild 11 Messergebnis für Probekörper aus Kiefer (wie links von der Rückseite abgebildet: Ergebnis der SAFT-Rekonstruktion mit einem experimentell bestimmten Geschwindigkeitsprofil unter Berücksichtigung der Kopfwelle, SAFT-C-Bild (Tiefenschnitt) in der Tiefe von $z = 118$ mm.

Es lässt sich also festhalten, dass für die SAFT-Rekonstruktion von Ultraschallechomessungen in Holz nicht nur die richtungsabhängigen Volumenwellen, sondern auch die durch Modenkonversion an der Oberfläche angeregten Kopfwellen berücksichtigt werden müssen. Dabei ist zu bemerken, dass die im Rahmen der Forschung durchgeführten Messungen mit jeweils einem Sende- und Empfangsprüfkopf einen großen Anteil von Oberflächenwellen erzeugen. Mit später in der Praxis eingesetzten größeren Prüfköpfen (z. B. 12+12 Prüfkopf oder Lineares Array) ist der Anteil der Oberflächenwellen jeweils neu zu berücksichtigen.

4.2 Fußgängerbrücke aus Sibirischer Lärche

Als Anwendungstest für das neu entwickelte bildgebende Ultraschallechoverfahren wurde eine Fußgängerbrücke gewählt, die im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens auf dem Gelände der BAM errichtet worden war (Pilotbrücke) [13]. Dabei handelt es sich um ein Hochleistungstragwerk aus Kunstharzpressholz mit dazwischen eingebrachtem Brettschichtholz aus Sibirischer Lärche. Die Träger haben eine Dicke von 20 cm (Symmetrierichtung T) bei einer Höhe von 34 cm, die Länge der Brücke beträgt 7,75 m.

Von der Brücke wurden mehrere Teilbereiche mit dem Ultraschallechoverfahren gemessen. Sie haben jeweils eine Länge von 1,20 m in Faserrichtung. Dafür wurde der Baustellenscanner für eine flächige Messung mit dem 1+1-Prüfkopf (Bild 12) und das lineare Array mit Scherwellen der Polarisation in Faserrichtung (L) eingesetzt (Bild 7).

Aus der 3D-SAFT Rekonstruktion sind beispielhaft zwei SAFT-C-Bilder parallel zur Messfläche (T/R-Ebene) in Tiefen dargestellt, in denen innere Reflektoren abgebildet sind (Bild 13). Die Rekonstruktionsrechnung erfolgte dabei mit Geschwindigkeitsprofilen, die mit dem Programm InterSAFT interaktiv anhand von Reflektoren mit bekannter Position im Brückenbauteil ermittelt und angepasst wurden (wie z.B. Rückwandecho und Reflexionen aus rückseitigen Kanten) [14]. Als Ergebnis liegt eine Koordinatenzuordnung der Reflektoren vor, die sich dreidimensional dem Bauplan, oder wie in Bild 14 den fotografierten Oberflächen, zuordnen lassen.

Es liegt nahe, die Reflektoren als innere Risse im Brettschichtholz zu deuten. Eine Verifikation ist erst später nach Abschluss der eigentlichen Forschungsarbeiten an der Fußgängerbrücke möglich. Es ist noch zu bemerken, dass solche Risse in vertikaler Richtung keinen Einfluss auf das Tragvermögen der Brücke hätten. Die Ergebnisse dienen also hier in erster Linie zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Prüfverfahrens. In

anderen Segmenten der Brücke durchgeführte Messungen zeigen keine auffälligen Reflektoren aus dem Inneren der Brettschichtholzträger.

Die Messungen mit dem linearen Array lassen sich auch sinnvoll mit einer isotropen Geschwindigkeitsannahme auswerten. Dabei wird das Rückwandecho für den TL-Wellenimpuls (Ausbreitungsrichtung T, Polarisation L) als maßgeblich für die Kalibrierung angenommen (hier $C_{TL} = 1280$ m/s). Der Grund, warum das funktioniert, liegt wahrscheinlich in der Konstruktion der für das Lineare Prüfkopfarray verwendeten Sendebänke aus jeweils 4 parallel geschalteten Punktkontaktprüfköpfen. Dadurch ist deren Schallfeld weitgehend in T-Richtung konzentriert und es wird entsprechend wenig Schallenergie in L-Richtung ausgesendet und reflektiert.

In Bild 15 sind zwei Ausschnitte aus der 3D-SAFT Rekonstruktion in der Tiefe von 107 mm parallel zur Oberfläche dargestellt. Es handelt sich um eine Wiederholungsmessung mit einem Zeitabstand von 7 Monaten, welche eine stabile Position der Reflektoren zeigt. In anderen Segmenten der Brücke sind keine entsprechenden Reflexionen gefunden worden.



Bild 12 Automatische Messwerterfassung mit Scanningsystem unter Verwendung des Ultraschallechogerätes A1220 (kommerziell erhältlich).

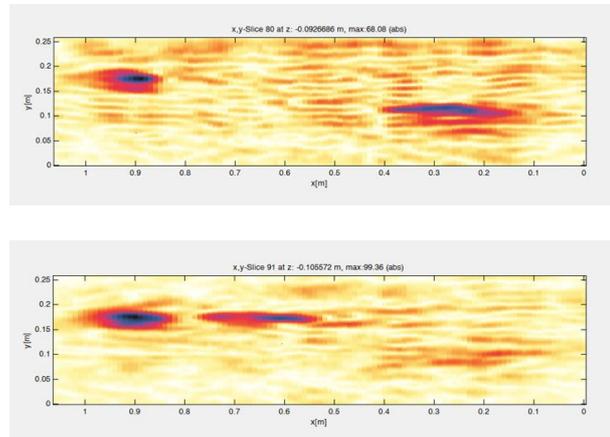


Bild 13 Rekonstruierte SAFT-C- Bilder ($x, y \sim L, R$) in 2 unterschiedlichen Tiefen ($z \sim T$: 92 mm, und 106 mm).

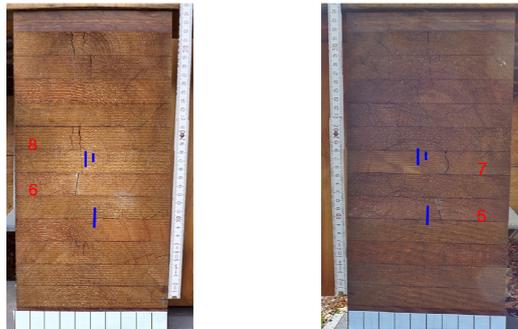
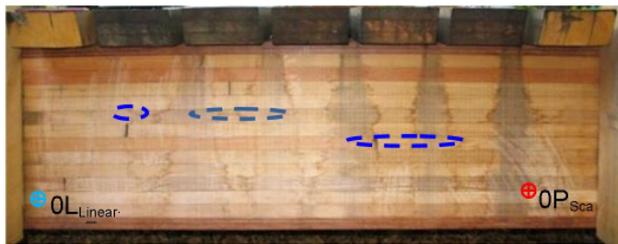


Bild 14 Draufsicht des Messfeldes Ost3 (oben) und Seitenansichten der Fußgängerbrücke (unten)
OP: Nullpunkt Scannermessung
OL: Nullpunkt Linear Array Messung
In blau: Lage der mit Ultraschallecho gefundenen Reflektoren

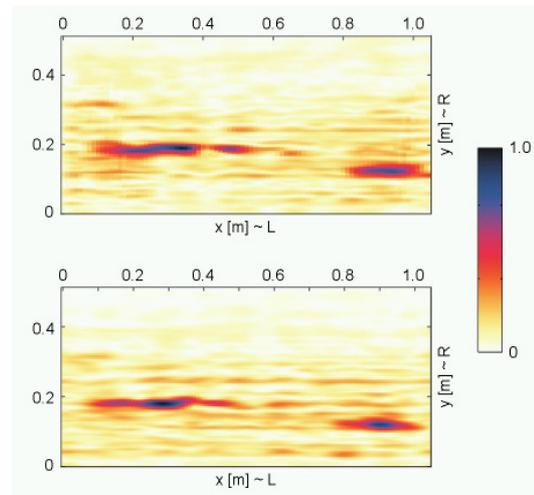


Bild 15 3D-isotrope Auswertung einer flächigen Messung mit dem Linear Array. Vergleich der Reflektorlage in der Tiefe von $z \sim T = 103$ mm für zwei Messungen mit einem Zeitabstand von 7 Monaten (oben September 2012, unten April 2013)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Präzisierung der ZfP von modernen Holzprodukten ist eine zukunftsweisende Aufgabe. Ultraschallecho-Verfahren im Frequenzbereich von 50 bis 100 kHz eignen sich prinzipiell, um Fehlstellen in akustisch anisotropem Brettchichtholz abzubilden (analog zur erfolgreichen Anwendung in isotropen Betonbauteilen).

Der erste Teil des Beitrags beschreibt den prinzipiellen Ansatz. Ausgehend von der Gruppengeschwindigkeit als maßgebliche Funktion für die Impulsausbreitung in Holz werden zunächst mit synthetischen Messdaten die Lokalisierung von Streuern mit einer anisotropen Version eines SAFT-Algorithmus entwickelt und am Beispiel einer Ortung von Kreisreflektoren mit Kenntnis der entsprechenden Gruppengeschwindigkeit gezeigt.

Scannende Messungen mit Punktkontaktprüfköpfen (einschließlich Linearem Array) zeigen für zwei Beispiele die ortsgenaue Abbildung von inneren Reflektoren. Für die Auswertung sind zusätzlich die Volumenwellen an der Oberfläche zu berücksichtigen, und zwar a) als zu unterdrückende Störsignale und b) als Ursache der zusätzlich für die Auswertung zu berücksichtigenden Kopfwellen. Mithilfe der interaktiven Weiterentwicklung der 3D-SAFT-Software InterSAFT wird die Gruppengeschwindigkeit ausgehend von den tabellierten Materialkonstanten an die tatsächlichen Werte des Messobjektes angepasst. Das rekonstruierte Datenfeld ist mit einem 3D-Browser und den entsprechenden Schnittebenen darstellbar.

Das durchgeführte Forschungsvorhaben hat wegweisende Ergebnisse dazu geliefert, mit welchen Wellenmoden und mit welcher Mess- und Auswertetechnik innere Reflektoren in Brettchichtholz ortsgenau abgebildet werden können. Es lässt sich aus den bisher vorliegenden Ergebnissen aber noch nicht ableiten, für welche Prüfaufgaben diese Art der Ultraschallabbildung praxisgerecht einsetzbar ist. Dafür sind weitere systematische

Untersuchungen an entsprechenden Probekörpern und entnommenen Bauteilen erforderlich.

6 Danksagung

Die Autoren danken der Förderung durch die Bundesmittel der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBR) sowie den Herren D. Rättsch (BAM 4.1) und M. Lange (BAM 8.2) für die Herstellung und Präparation zahlreicher Probekörper.

Dem Fachbereich 8.6 der BAM und dem Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB e.V. Berlin) für die Ermöglichung der Testmessungen an der Fußgängerbrücke und der Unterstützung insbesondere von Herrn Dipl.-Ing. D. Hofmann sei ebenfalls gedankt.

7 Referenzen

- [1] Schickert, M. and M. Krause: Ultrasonic techniques for evaluation of reinforced concrete structures , In: Maierhofer, Ch., Reinhardt, H.-W. and G. Dobmann (eds.); Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Part II.22, pp. 490-530.
- [2] Krause, M., Borchardt, K., Lange, M., Behrens, M., Maack, S., Mielentz, F. Milmann, B., Schaurich, D., Wöstmann, J., Hintzpeter, F. und Ch. Sodeikat: Kosteneinsparung durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Betonbauteile beim Bauen im Bestand. Bauforschung für die Praxis, Band 101, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (2011), 95 Seiten.
- [3] Hasenstab, A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren (Dissertation). Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (Hrsg.); BAM-Dissertationsreihe, Band 16, Berlin (2006) 190 S. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften - Dr.-Ing.
- [4] Hasenstab, A., Hillemeier, B. and M. Krause: Defect Localisation in Wood with Low Frequency Ultrasonic Echo Technique. In: Proceedings of the 14th International Symposium on NDT of Wood, 02.-04.05.05, Hannover, Germany (2005).
- [5] Frühwald, K., Peterson, L. und A. Hasenstab: Prüfverfahren zur Begutachtung der Materialeigenschaften von Holztragwerken. In. Fouad, N. (Hrsg.); Bauphysik Kalender 2012, Berlin: Ernst & Sohn, S.105-155.
- [6] Krause, M., Effner, U., Müller, S., Nowak, Th., Borchardt, K., Mayer, K., Chinta, P.K. und G. Ballier: Final report of research project: Hochgenaue Strukturerkennung von Holzbauteilen mit 3D-Ultraschall. Berlin – Bonn, 2013. wird veröffentlicht in: <http://www.baufachinformation.de/forschungsberichte>
- [7] Krause, M., Chinta, P.K., Mayer, K., Effner, U. and S. Müller: NDT of Structural Timber Members by means of 3D Ultrasonic Imaging Techniques and Modelling. In: Proceedings of the International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures NDTMS-2011, May 15-18, 2011, Istanbul, Turkey.
- [8] Bucur, V.: Acoustics of Wood, 2nd Edition. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany (2006).
- [9] Schubert, S.: Acousto-Ultrasound Assessment of Inner Wood-Decay in Standing Trees. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 17126, 2007. <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:29504/eth-29504-02.pdf>
- [10] Chinta, P., Mayer, K. und M. Krause: Ultraschallmodellierung und SAFT-Rekonstruktion von Fehlstellen in Holzbauteilen. In: Berichtsband der DGZfP-Jahrestagung 2010, Erfurt, 10.-12. Mai 2010, BB 122-CD, Poster 59, 8 Seiten.
- [11] Marklein, R.: Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblem im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik. Dissertation: University of Kassel, Germany (1997).
- [12] Bishko, A.V., Samakrutov, A.A. and V.G. Shevaldykin: Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays, proceedings: 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China, (2008), 9 pages.
- [13] Hamann, M., Kubowitz, P., Habel, W., Hofmann, D.: Hochleistungsholztragwerke – HHT – Entwicklung von hochbelastbaren Verbundbauweisen im Holzbau mit faserverstärkten Kunststoffen, technischen Textilien und Formpressholz, Aufstockung: „Ersteinsatz von optischen Messfasern in

- Holzbauteilen“. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (Hrsg.); Abschlussbericht, Berlin (2013), 103 S, ISBN 978-3-9815360-8-9.
- [14] Mayer, K.: Softwarepaket *InterSAFT* zur bildgebenden Auswertung von Ultraschallechomessungen an Holzbauteilen. Im Auftrag der BAM (2008).