

## Kurzbericht

zum Forschungsvorhaben

**Hochgenaue Strukturerkennung von Holzbauteilen  
mit 3D-Ultraschall**

**Projektleiter: Dr. Martin Krause**

**Bearbeiter: Dr. Ute Effner, Boris Milmann, Sabine Müller,  
Thomas Nowak und Kerstin Borchardt**

**BAM, FB 8.2 Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren**

**UNI KASSEL  
VERSITÄT**

Partner:

**CEP**   
Computational  
Electronics & Photonics

**Leiter: Dr. Klaus Mayer**

**Mitarbeiter: Dr. Prashanth Kumar Chinta und Gregor Ballier**  
Universität Kassel, Fachgebiet Theorie der Elektrotechnik und Photonik

**Januar 2013**

**BAM-Nummer** 8.2 Vh 4454

**Förderer** Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.  
(Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-10.5 / II 3–F20-09-1-220)  
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

M. Krause<sup>1</sup>, U. Effner<sup>1</sup>, B. Milmann<sup>1</sup>, S. Müller<sup>1</sup>, Th. Nowak<sup>1</sup>, K. Borchardt<sup>1</sup>,  
K. Mayer<sup>2</sup>, P.K. Chinta<sup>2</sup>, G. Ballier<sup>2</sup>

## 1 Einleitung und Motivation

Mit Berücksichtigung der akustisch anisotropen Eigenschaft des Holzes soll in dem beantragten Projekt die Grundlagen für ein abbildendes Ultraschallverfahren für Holzbauteile entwickelt und auf den Weg einer praxismgerechten Anwendung gebracht werden. Mit der dann verbesserten Prüfbarkeit ohne äußeren Eingriff soll ein Beitrag zur dauerhaften Standsicherheit von Holzkonstruktionen geleistet und somit die Wettbewerbsfähigkeit der Holzwirtschaft gesteigert werden.

Es erscheint sinnvoll, zunehmend Holz als Baustoff zu verwenden. Dies ergibt sich aus der Nachhaltigkeit des Holzes als nachwachsenden Rohstoff, seiner natürlichen Eigenschaft als Kohlenstoffspeicher und der positiven Energiebilanz, wenn man den Primärenergieinhalt der erneuerbaren Energieträger berücksichtigt (im Holz gespeicherte und wieder verwertbare (*graue*) Energie).

Aufgrund immer wieder auftretender Schadensfälle an Holzbauteilen, hervorgerufen z. B. durch Nichtbeachtung des konstruktiven Holzschutzes, ergibt sich für Holzkonstruktionen im Bestand ein erhöhter Prüfbedarf. Dies betrifft sowohl die regelmäßige Sicherheitsüberwachung als auch die Dauerhaftigkeit der Konstruktion sowie die Qualitätssicherung der Bauausführung.

In dem Forschungsvorhaben wird die für Holz neue 3-D-Rekonstruktionsrechnung verwendet und mit dem Ziel weiterentwickelt, unter Berücksichtigung der anisotropen Struktur des Holzes eine dreidimensional aufgelöste Abbildung von Reflektoren im Inneren der Holzbauteile zu ermöglichen. Damit werden die bisher für Holzbauteile zur Verfügung stehenden Verfahren entscheidend ergänzt, da nun eine hochgenaue dreidimensionale Abbildung erreichbar ist (Auflösung: 20 mm und besser). Dies soll dazu dienen, die Errichtung von Holzbauwerken hoher Qualität zu unterstützen und diese Qualität in sinnvollen Intervallen mit dem Ziel einer hohen Dauerhaftigkeit zu überwachen.

## 2 Methodisches Vorgehen

Eine große Rolle bei der Beurteilung von Holzkonstruktionen aus modernen Holzbauteilen wie z. B. Brettschichtholzbindern, Duo- und Triobalken spielen Fehlverklebungen, Risse aus Last, Risse an Verbindungsmitteln und Fehlstellen.

Ziel des Vorhabens ist die zerstörungsfreie Detailuntersuchung von Holzbauteilen mit einem neuen dreidimensional abbildenden Ultraschall-Echoverfahren. Das neu entwickelte 3-D-Verfahren berücksichtigt den anisotropen Aufbau des Holzes. Die Bildschnitte und Projektionen werden aus flächigen Ultraschallaufnahmen berechnet. Die Messungen erfolgen an Probekörpern sowie an Bauteilen aus der Praxis.

Wichtig ist für die zerstörungsfreie Prüfung, dass die Fehleranzeigen von für das Bauteil unkritischen Störanzeigen, wie z. B. Äste und Schwindrisse, sicher unterschieden werden können. Das bisher zur Verfügung stehende Verfahren erlaubt in der Regel nur einen indirekten Hinweis auf Verdachtsstellen. Die genaue Identifizierung und Ortung muss bisher mit zerstörungssarmen Verfahren erfolgen.

Das neu entwickelte Auswerteprogramm [1] zur Auswertung von Ultraschallecho-Messungen von Holzbauteilen wird schrittweise für die dreidimensionale Strukturanalyse herangezogen und weiterentwickelt [2]. Wesentlich für eine gute Prüfaussage ist dabei die Kenntnis der elastischen Konstanten des Bauteils [3], bezogen auf die drei Symmetrierichtungen (Erklärung s. Fußnote<sup>3</sup>). Speziell für diesen Punkt stellte sich im Rahmen der Arbeit heraus, dass für die Lösung dieser

---

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12200 Berlin

<sup>2</sup> Universität Kassel, 34121 Kassel

Aufgabe wesentlich mehr Grundlagen der Schallausbreitung in Holzbauteilen erarbeitet werden mussten, als ursprünglich angenommen.

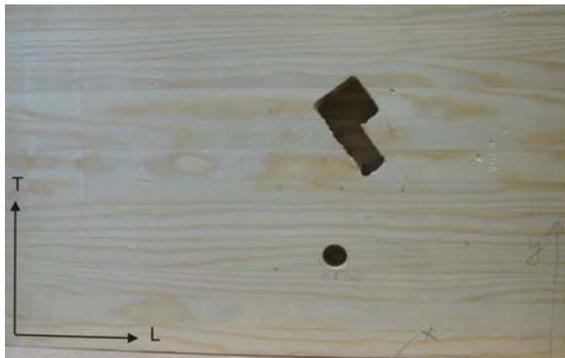
Die Messungen an dem Holzprobekörper bzw. den Holzbauteilen wurden mit einem scannenden System durchgeführt. Bei diesem wurde der Prüfkopf so modifiziert, dass ein 1x1-Messkopf (Sender - Empfänger) Verwendung fand. Das Linear-Array „MIRA“ [4] ist kommerziell erhältlich. Die SAFT-Auswertesoftware wurde speziell auf die Bedürfnisse der Universität Kassel angepasst und entwickelt [1]. Vereinzelt wurden auch Untersuchungen mit dem kommerziell erhältlichen A1220 durchgeführt, welches wie das Linear-Array jedoch nur mit Transversalwellenköpfen betrieben wurde.

### 3 Ergebnisse der Messungen

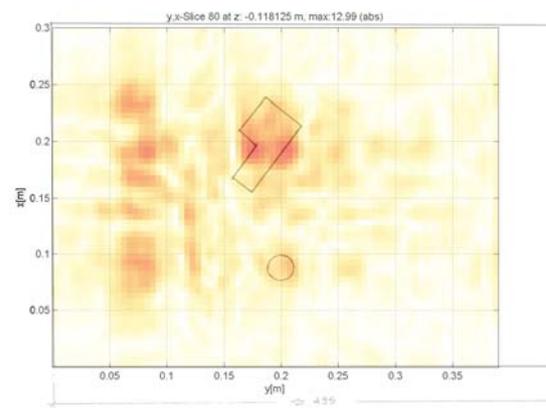
Der Fortgang der Untersuchungen und der Programm-Weiterentwicklung sollen exemplarisch an einigen Beispielen aufgezeigt werden:

#### 3.1 Messungen an dem Kiefernprobekörper x1124

Nach verschiedenen Untersuchungen an Probekörpern ohne Fehlstellen, wurde in den Kiefernprobekörper x1124 (Maße 49,5 cm x 30,1 cm x 14,5 cm) eine L-förmige Fehlstelle (Maße: 7,5 cm x 4,3 cm) eingefräst, wie in Bild 1 gezeigt. Die Holzprobekörper wurden aus 4-Kanthölzern zusammengeleimt. Die Messungen wurden scannend mit einem Transversalwellen-Prüfkopf in Ausbreitungsrichtung R (radial) und Polarisationsrichtung L (längs bzw. axial)<sup>3</sup> mit einer Schrittweite von 5 mm durchgeführt.



**Bild 1** Großer Kiefernholz-Probekörper (Pk x1124) mit L-förmiger Fehlstelle (Rückseite)

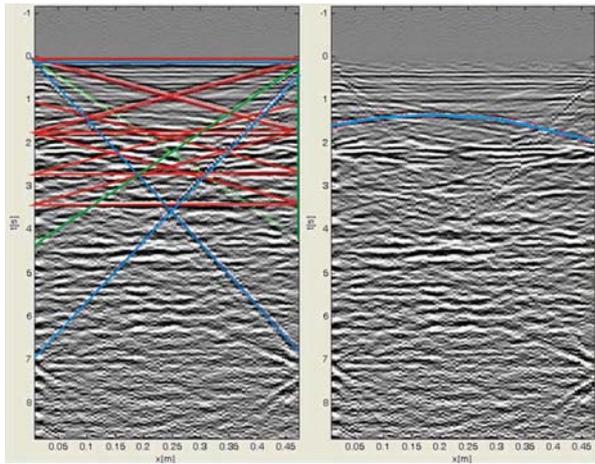


**Bild 2** Tiefenschnitt (C-Bild, Zeitscheibe) einer 3-D-SAFT-Rekonstruktion, Tiefe  $z = 118$  mm mit eingezeichneter Fehlstellenlage

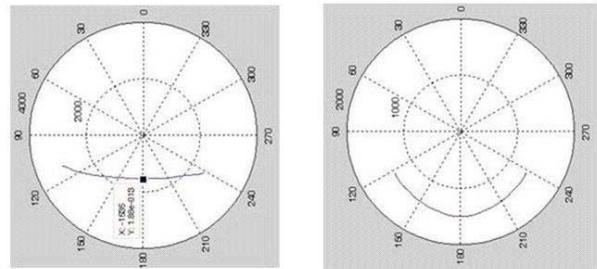
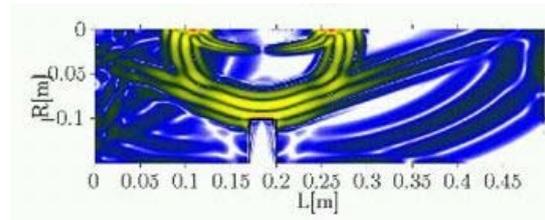
Bild 2 zeigt einen Tiefenschnitt (C-Bild) der SAFT-Rekonstruktion. Dort ist die Lage der Fehlstellen mit dem Rekonstruktionsergebnis überlagert. Die Fehlstelle ist nur andeutungsweise abgebildet und wäre ohne Vorkenntnisse nicht von Störanzeigen zu unterscheiden.

Die Ultraschalldaten zeigen viele Oberflächenwellen, die am Probekörpertrand reflektiert werden (siehe B-Bild links in Bild 3). Diese wirken sich störend auf die SAFT-Rekonstruktion aus, können jedoch mithilfe des intersaft-processings herausgefiltert werden. So wird in Bild 3 im rechten B-Bild die Hyperbel des unten liegenden Reflektors erkennbar, wie sich nach Filterung der Oberflächenwellen deutlich ergibt.

<sup>3</sup> R = radial, L = längs oder axial, T = tangential, die angegebenen Richtungen beziehen sich auf die Wuchsrichtung des Baumes

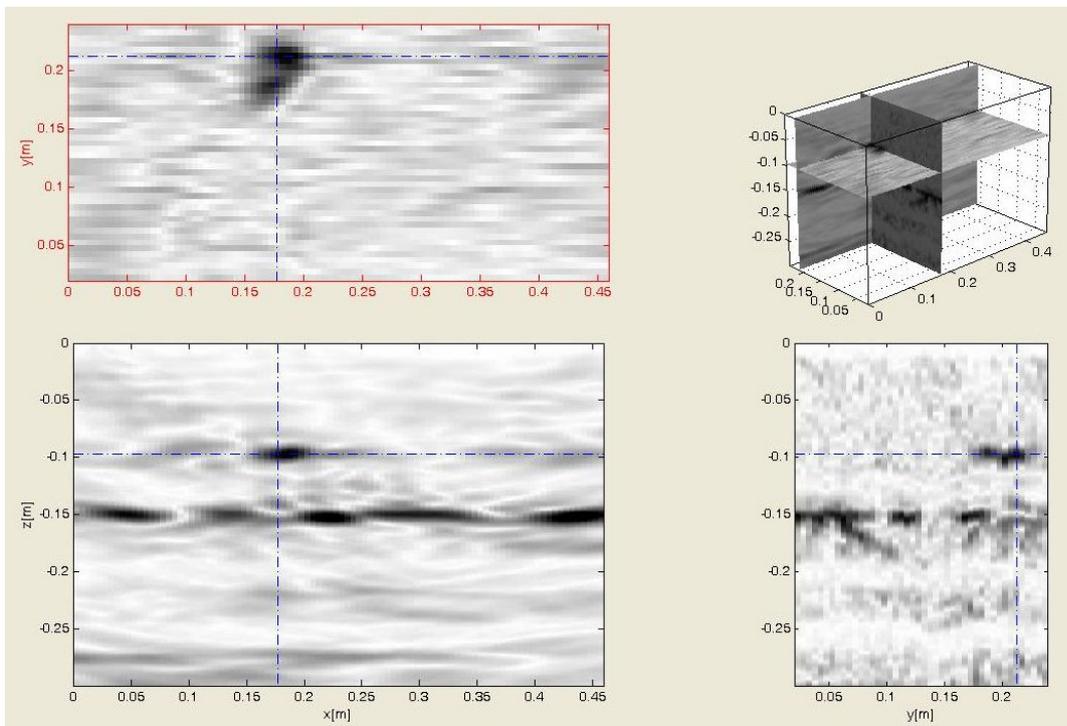


**Bild 3** Auswertung der Messung an Kiefernholz: Ermittlung und Unterdrückung der Oberflächenwellen (links), Identifikation der Hyperbel des Streuers (rechts)



**Bild 4** Kopfwellen erzeugt durch Anregung der Polarisation TL in Kiefernholz (gemäß der Modellierung)  
unten: Polardiagramm der Geschwindigkeiten in L- (links)– und T-Richtung (rechts)

Wie in Bild 4 oben dargestellt, wird bei der Schwerwellenanregung mit der Polarisationsrichtung L zusätzlich eine Oberflächenwelle in L-Richtung angeregt. Daraus bildet sich im Volumen eine schräglauende Kopfwelle ähnlich einer ebenen Welle, die mit der (langsameren) Scherwelle verbunden ist. Die Kopfwelle verbindet die langsame quasi-Transversalwelle  $qT1$  und die schnelle quasi-Longitudinalwelle  $qL$ . Daraus ergibt sich nun experimentell das Polardiagramm in Bild 4 unten. Mit Hilfe der Hyperbel-Funktion werden die Wellen  $qL$  und  $qP2$  kombiniert.



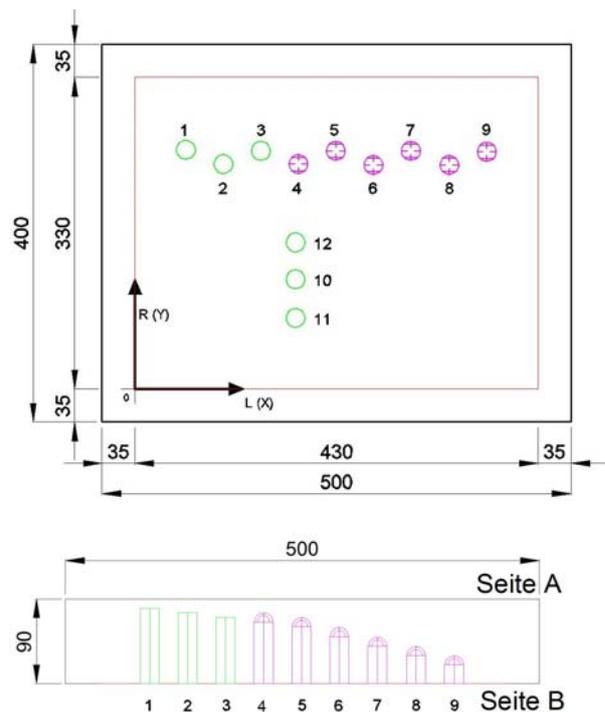
**Bild 5** Kiefer x1124: Ergebnis der Rekonstruktionsrechnung mit experimentell ermitteltem Geschwindigkeitsprofil

Wird das ermittelte Geschwindigkeitsprofil bei der Rekonstruktions-Rechnung berücksichtigt, ergibt sich die Darstellung der L-förmigen Fehlstelle wie in Bild 5 gezeigt. Hier wird die Lage und Form der Fehlstelle gut erkennbar abgebildet.

In Bild 5 ist neben der Rekonstruktion der Fehlstelle ebenfalls gut die 3-D-Darstellung des Simulationsergebnisses abgebildet. Die Ebenen  $yx$  (in Bild 5 oben links),  $zx$  (in Bild 5 unten links),  $zy$  (in Bild 5 unten rechts) sowie die 3-D-Gesamtdarstellung (in Bild 5 oben rechts) sind zu sehen. Die Möglichkeit einer 3-D-Darstellung der rekonstruierten Messergebnisse an Holzbauteilen, ist ein wichtiger Bestandteil des Projektes.

### 3.2 Messungen an dem Fichtenholzprobekörper F245

Weitere Untersuchungen fanden an dem Fichtenholzprobekörper F245 statt.



**Bild 6** Fichtenholzprobekörper F245 (Maße: 50 cm x 40 cm x 9 cm) mit eingefügten Fehlstellen auf der Rückseite

**Bild 7** Modifizierte Kreisscheibenreflektoren im Probekörper Fichte 245 (Alle Maße in mm)  
Oben: Ansicht der Reflektoren von der Messeite A  
Unten: Seitenansicht; Grün: ursprüngliche Position beibehalten, rot: modifiziert mit halbkugelförmigen Rundungen

Der Probekörper Fichte245 (Bild 6) wurde so geleimt, dass die Messung in  $T\sim z$ -Richtung erfolgen konnte und die Polarisation in  $L\sim x$ - oder  $R\sim y$ -Richtung (für Transversalwellen) zeigt.

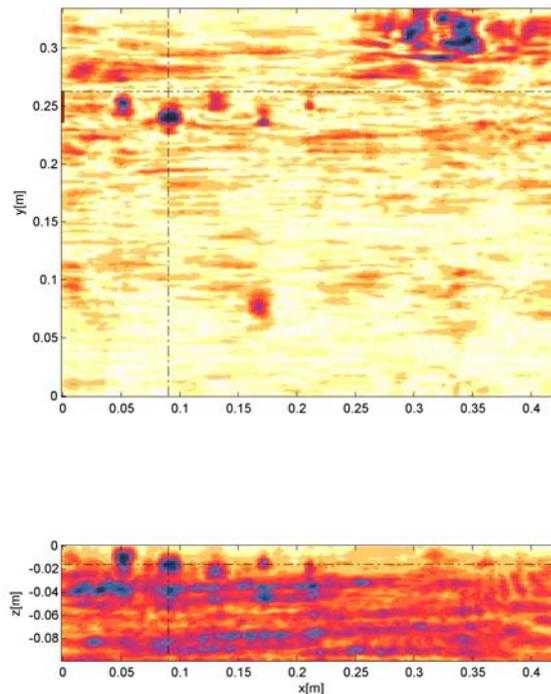
Die Messungen wurden wiederum mit einem scannenden System durchgeführt mit Transversalwellen-Prüfköpfen (1 Sender x 1 Empfänger) bei einer Frequenz von 75 kHz bzw. mit Longitudinalwellen-Prüfköpfen (1 Sender x 1 Empfänger) bei einer Frequenz von 75 kHz. Bei der Referenzmessung mit Transversalwellen mit der Polarisation in L-Richtung ist im B-Bild bei  $t = 137 \mu s$  das Echo der Rückwand sichtbar. Diese Reflexion ist bei der Polarisation in R-Richtung nicht nachweisbar. Wiederum sind bei den Messungen die Oberflächenwellen sehr ausgeprägt. Diese Wellen wirken sich auf die SAFT-Rekonstruktion störend aus und müssen speziell bearbeitet werden, am günstigsten durch Unterdrückung bzw. Filterung.

Hier werden exemplarisch die Ergebnisse der Messungen bei Anregung mit der Polarisation TT beschrieben, d. h. Anregung mit Longitudinalwellen. Eine Übersicht des Ergebnisses zeigt Bild 8.

Im SAFT-B-x~L,z~T-Bild ist nur der Bereich dargestellt, in dem die Kreisscheiben liegen. Man erkennt deutlich die Kreisscheiben 1 bis 5.

Zusätzlich erscheint bei  $z = 40$  mm eine leicht nach oben geneigte Reflexionslinie. Auf dieser befindet sich ein Reflektor, der in der x- und z-Position mit der gewölbten Kreisscheibe 6 übereinstimmt (254 mm, 39 mm), aber im SAFT-C-Bild keine Entsprechung hat. Mögliche Ursachen dafür sind:

- der Wechsel der Symmetrie der Holzquader (Änderung der Neigung der Jahresringe) oder
- ein Mangel in der Leimfuge.



**Bild 8** Fichte 245 mit modifizierten Kreisscheiben, Polarisation TT, Ergebnis der 3-D-SAFT-Rekonstruktion mit elliptischem Geschwindigkeitsprofil und 2-D-Rekonstruktion. Projektion des y~R-Bereiches der Kreisscheiben (x~L, z~T)

Mit den Druckwellen (Polarisation TT) gelingt eindeutig die genaueste Abbildung der Kreisscheibenreflektoren. Sowohl die Flachbodenbohrungen als auch die nachträglich mit einer Wölbung versehenen Reflektoren 1 bis 5 werden in x-, y- und z-Richtung mit einer maximalen Abweichung von 5 mm abgebildet.

Es ist allerdings festzuhalten, dass sich die tiefste abgebildete Kreisscheibe (No.6) im Probekörper Fichte 245 in einer Tiefe von 39 mm befindet. Damit liegt dieser Reflektor oberhalb der Leimfuge. Eine saubere Abbildung scheint also entweder durch die Leimung oder den Wechsel der Jahresringneigung, also der Änderung der Symmetrie, verhindert zu werden.

### 3.3 Anwendung an Bauwerken – Fußgängerbrücke Fabeckstraße

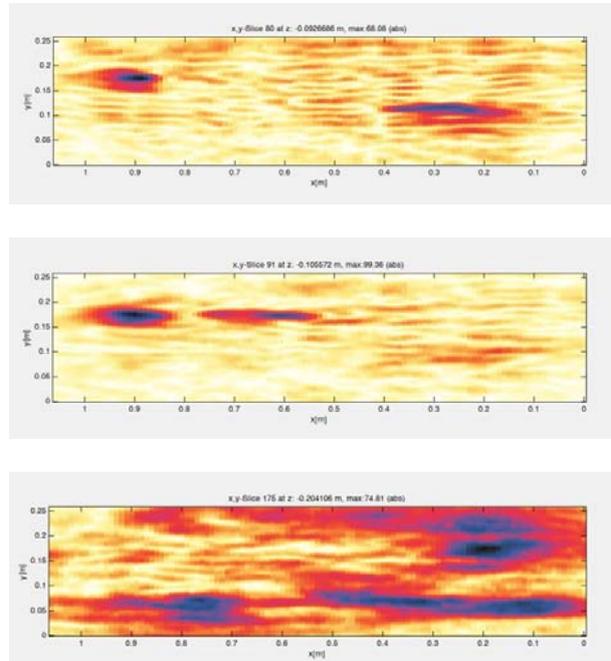
An dem Beispiel der Fußgängerbrücke, die für ein anderes Projekt erbaut wurde, konnte erprobt werden, wie sich die an den Holzprobekörpern entwickelte Methode zur 3-D-Darstellung der Ultraschall-Messungen bewährt. Die Holzbrücke wurde aus Brettschichtholz aus Sibirischer Lärche hergestellt.

Die Messungen wurden mit einem Scanner (s. Bild 9), an welchem ein Transversalwellen-Prüfkopf mit 1 Sender x 1 Empfänger montiert war, in TL-Polarisation durchgeführt. Für die SAFT-Rekonstruktion wurde die Geschwindigkeit mit einer elliptischen Annäherung angepasst, die in das Auswerteprogramm inter-saft integriert wurde.

In Bild 10 sind die rekonstruierten C-Scans in verschiedenen Tiefen  $z=92\text{ mm}$ ,  $106\text{ mm}$  und  $204\text{ mm}$ , was der Rückwand entspricht, abgebildet. Die Rekonstruktion erfolgte mit der elliptischen Näherung. Es ist zu erkennen, dass die Ortsauflösung in  $x$ -Richtung gut ist, was darauf zurückgeht, dass bei der Rekonstruktionsrechnung die schiefwinkligen Ausbreitungsrichtungen gemäß der winkelabhängigen Gruppengeschwindigkeit berücksichtigt werden.

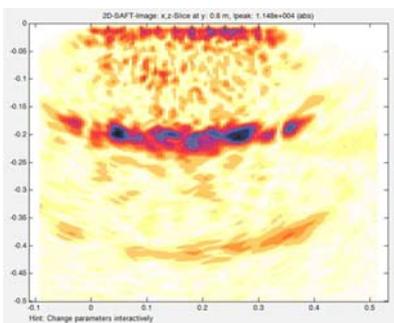


**Bild 9** Automatisiertes scannendes System mit einem kommerziell erhältlichen A1220-Interface

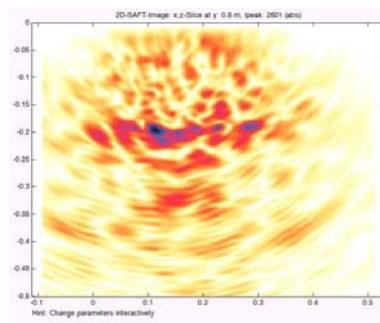


**Bild 10** Rekonstruierte SAFT-C-Scans ( $x\sim L$ ,  $y\sim R$ ) in 3 verschiedenen Tiefen:  $92\text{ mm}$ ,  $106\text{ mm}$ ,  $204\text{ mm}$  (Rückwand)

Da die Reflektoren in  $L$ -Richtung lang ausgedehnt und in  $R$ -Richtung gemäß dem SAFT-B( $R\sim y/T\sim z$ )-Bild auf ca.  $30\text{ mm}$  begrenzt sind, legt das die Deutung der Reflektoren als gerissene Bereiche einzelner oder mehrerer benachbarter Lamellen des Brettschichtholz-Trägers nahe. Eine eindeutige Zuordnung als einzelne senkrechte Risse ist aber nicht möglich. Die Reflektoren können zunächst nur als Auffälligkeit klassifiziert werden. Eine genauere Analyse wird erst nach einer späteren Verifizierung möglich zu sein.



alle Abstände



nur Messkopf-Abstände von  $6\text{ cm}$

**Bild 11** Fußgängerbrücke aus Brettschichtholz aus Sibirischer Lärche. Messungen mit dem Linear-Array.  
links: Für die SAFT-Rekonstruktion wurden Datensätze von allen 12 Prüfkopf-Segmenten verwendet.  
rechts: für die SAFT-Rekonstruktion wurden Datensätze von Prüfkopf-Segmenten verwendet, die einen Abstand von  $12\text{ cm}$  hatten.

Weitere Untersuchungen an der Fußgängerbrücke wurden mit dem kommerziell erhältlichen Linear-Array „MIRA“ durchgeführt. Die Messungen und die Rekonstruktionen zeigten ein ähnliches Ergebnis wie solche mit dem scannenden System.

Die Ergebnisse des mit dem Linear Array aufgenommenen flächigen Datensatzes lassen sich zusätzlich dahingehend auswerten, ob eine Querdurchschallung durch die Lamellengrenzen zur Abbildung der Reflektoren beiträgt. Dazu dient ein spezielles Auswertungstool im Softwarepaket intersoft, bei dem ein bestimmter Abstand von Sende und Empfangskopf gewählt werden kann, der für die Rekonstruktionsrechnung ausgewertet wird.

Normalerweise werden alle Sende und Empfangspositionen für die Rekonstruktionsrechnung herangezogen wie in Bild 11 links, das heißt die Matrixhälfte der Sende- und Empfangspositionen ist vollständig angewählt. Je nachdem, ob man wenig oder mehr unterschiedliche Abstände für die Rekonstruktionsrechnung anwählt, ergibt sich im Vergleich eine mehr oder weniger gute Abbildungsqualität des Rückwandechos. Das Rückwandecho ist auch bei großen Prüfkopfabständen eindeutig abgebildet, wie in Bild 11 rechts zu sehen, was bei einer Lamellenbreite von 28 mm nur mit Querdurchschallung möglich ist

Die Fallstudien an der Fußgängerbrücke Fabeckstraße zeigen, dass mit den im Rahmen des Vorhabens entwickelten Möglichkeiten der Ultraschallechoverfahren mit dreidimensionaler bildgebender Auswertung eine ortsgenaue Abbildung von inneren Reflektoren in Brettschichtholz gelingt. Eine Verifikation der Ergebnisse konnte allerdings noch nicht erfolgen. Dies wird erst nach Abschluss der eigentlichen Forschungsarbeiten an der Brücke bezüglich des Dehnungsverhaltens möglich sein, wenn die Brücke für eine zerstörende Prüfung freigegeben wird.

### **3.4 Untersuchungen an Brettschichtholz aus der Praxis**

Es wurden zusätzlich Untersuchungen an Brettschichtholzbindern aus Fichtenholz durchgeführt. Diese waren einer Dachkonstruktion entnommen. Die Messungen mit dem Scanner zeigen jedoch keine Ergebnisse, die auf innere Reflektoren hindeuten. Auch das Echo der Rückwand des Probekörpers kann nicht dargestellt werden. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Schallausbreitung auf geführte Wellen entlang der Lamellen des Brettschichtholzes beschränkt ist. Oder dass Risse entlang der Lamellen bzw. eine mangelnde Verklebung eine Darstellung der Rückwand verhindern.

Die Rekonstruktion der mit dem Scanner erhaltenen Messdaten wurde mittels SAFT durchgeführt. Dabei wurde eine elliptische Geschwindigkeitsverteilung angenommen. Obwohl einzelne C-Bilder teilweise sehr detailreich sind, sind keine Reflektoren zu erkennen, die mit der tatsächlichen Struktur des Binders erkennbar übereinstimmen.

In der Auswertung des kombinierten Datensatzes mit 3-D-SAFT mit elliptischer Geschwindigkeitsanpassung ist andeutungsweise das Rückwandecho zu erkennen. Die Qualität der Abbildung und die zahlreichen Rückstreuungen aus dem Inneren des Volumens ermöglichen aber keine eindeutige Zuordnung von Streuern. Es ist also festzuhalten, dass der aktuelle Stand der Auswertemethoden noch nicht ausreicht, um an einem Brettschichtholzträger dieser Bauweise und Qualität verwertbare Ergebnisse zu erzielen

Es fanden noch weitere Messungen an geschädigten Balkonkonstruktionen aus Brettschichtholz statt, die von einem Partner vermittelt wurden. Die Ultraschall-Messungen wurden mit dem A1220 durchgeführt. Das kommerzielle Handgerät ist mit einem Transversalwellen-Prüfkopf ausgestattet und wird bei einer Frequenz von 55 kHz betrieben.

Die Rückwand der Balkonstütze ist gut sichtbar. Es ist auch der zweite Rückwandreflex erkennbar. Dagegen ist an der defekten Stütze die Rückwand nicht mehr deutlich erkennbar. Es kommt zu Abschattungen des Signals.

Weitere Untersuchungen an diesen Balkonstützen werden noch folgen, da in Folge der Restaurierung der Balkone die defekten Stützen entfernt und zu Untersuchungszwecken zur Verfügung gestellt werden. Da dies erst in den nächsten Wochen geschieht, konnten diese Ergebnisse nicht mehr in den Bericht aufgenommen werden.

## **4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Der Ansatz des Forschungsvorhabens gilt den abbildenden Ultraschallverfahren im Frequenzbereich von 30 bis 100 kHz für die zerstörungsfreie Prüfung von Holzbauteilen. Es wird eine ähnliche Leistungsfähigkeit angestrebt wie sie inzwischen für Betonbauteile erreicht wurde. Die Messungen

erfolgen flächig mit Punktkontaktprüfköpfen, die bildgebende Auswertung nach dem Prinzip der Rekonstruktionsrechnung. Die Ergebnisse können in einem 3-D-Visualisierungsprogramm analysiert werden. Die Modellierung der Ultraschallausbreitung in Holz geschieht mit der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT) und die verwendete Rekonstruktionsrechnung (3-D-SAFT, Synthetische Aperture Focusing Technique) wurde zu diesem Zweck von der Universität Kassel weiterentwickelt. Somit konnte das Programm für Ultraschallmessdaten von Holzbauteilen angewendet und für die baupraktischen Aufgaben ertüchtigt werden. Über den Vergleich der Ergebnisse mit dem tatsächlichen Zustand der Holzbauteile erfolgt eine Bewertung des Verfahrens für verschiedene Holzarten und Aufgaben.

Bevor praktische Anwendungen beispielhaft angegangen werden konnten, waren langwierige Grundlagenuntersuchungen an idealisierten Probekörpern erforderlich.

Speziell bei kleinen Bauteilen sind die Analyse, die rechnerische Berücksichtigung und die Unterdrückung der Oberflächenwellen wesentlich. Die für die Abbildung erforderlichen richtungsabhängigen Materialgeschwindigkeiten werden anhand von bekannten Reflektoren und der Anpassung des Geschwindigkeitsprofils für das aktuell verwendete Material bestimmt.

Die Abbildung von künstlichen Reflektoren gelingt in vielen Fällen nur, wenn die durch die Oberflächenwellen im Volumen angeregten Kopfwellen berücksichtigt werden.

In Brettschichtholz aus Fichte gelingt die genaueste Abbildung von Flachbodenbohrungen mit der TT-Polarisation (Druckwellen in T-Richtung (tangential zu den Jahresringen)). Mit den anderen Polarisationen TL (Scherwellenausbreitung tangential zu den Jahresringen und polarisiert in Faserichtung), sowie TR (Polarisation in radialer Richtung), werden nur teilweise genaue Abbildungen erreicht.

Die im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse werden erfolgreich an einer Fußgänger-Forschungsbrücke demonstriert. Insgesamt werden aus den Ergebnissen der Forschungsarbeit Hinweise für ein Gerätekonzept für die praxisingerechte Ultraschallprüfung abgeleitet.

Das Vorhaben hat überwiegend Ergebnisse dazu geliefert, mit welchen Wellenmoden und mit welcher Mess- und Auswertetechnik Reflektoren in Holzbauteilen ortsgenau abgebildet werden können. Hier gibt es wegweisende Ergebnisse, aus denen sich aber noch nicht ableiten lässt, für welche konkreten Prüfaufgaben diese Art der Ultraschallbildgebung praxisingerecht einsetzbar ist. Dafür sind weitere systematische Untersuchungen an entsprechenden Probekörpern und entnommenen Bauteilen erforderlich.

## 5 Literatur

- [1] Mayer, K., Softwarepaket inter-saft zur bildgebenden Auswertung von Ultraschallechomesungen an Holzbauteilen, im Auftrag der BAM, 2008
- [2] Mayer, K., Chinta, P., Langenberg, K.-J. and M. Krause, Ultrasonic Imaging of Defects in Known Anisotropic and Inhomogeneous Structures with Fast Synthetic Aperture Methods, Proceedings of the 18th World Conference on Non-Destructive Testing, 16. - 20.04.2012, CD-ROM, 10 pages, Durban, South Africa, (2012)
- [3] Bucur, V., Acoustics of Wood, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2006
- [4] Bishko, A.V., Samakrutov, A.A., Shevaldykin, V.G., Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays, proceedings: 17Th Wold Conference on Nondestructive Testing, 25 - 28 Oct 2008, Shanghai, China, (2008), 9 pages