

BAUFORSCHUNG FÜR DIE PRAXIS, BAND 109

Martin Krause, Klaus Mayer
Gregor Ballier, Kerstin Borchardt, Prashanth Kumar Chinta,
Ute Effner, Boris Milmann, Sabine Müller, Thomas Nowak

Hochgenaue Strukturerkennung von Holzbauteilen mit 3D-Ultraschall

Fraunhofer IRB Verlag

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem
Förderkennzeichen Z6 10.08.18.7-08.6/II 2 F20-08-014
vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, mit Mitteln der
Forschungsinitiative Zukunft Bau gefördert. Für den Inhalt sind allein die Verfasser
verantwortlich.

Die Autoren danken BAM-8.1 und dem laFB e.V. Berlin für das Ermöglichen der
Messungen an der Versuchs-Holzbrücke und Herrn Dipl.-Ing D. Hofmann für die
Unterstützung bei der Organisation.

Druck und Weiterverarbeitung:

IRB Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **Fraunhofer IRB Verlag**, 2014

ISBN 978-3-8167-9212-3

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

Telefon 0711 970-2500, Telefax 0711 970-2508

E-Mail info@irb.fraunhofer.de

URL www.baufachinformation.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warennamen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen werden oder aus ihnen zitiert werden, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.



BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T



Bundesamt
für Bauwesen und
Raumordnung

Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben

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

BAM:

**M. Krause (Projektleiter) ,
U. Effner, B. Milmann, S. Müller, Th. Nowak, K. Borchardt**

Universität Kassel:

**K. Mayer (Leiter)
P. K. Chinta, G. Ballier**

31. Januar 2013

korrigierte Version Mai 2014

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.

Inhalt

1	Veranlassung und Ziel	4
2	Einleitende Übersicht	5
2.1	Motivation	5
2.2	Ultraschallverfahren für Holzbauteile.....	5
2.3	Aufgabenstellung, Ziele und Vorgehensweise.....	6
2.3.1	Forschungsförderer und begleitende Arbeitsgruppe.....	7
3	Methoden und Verfahren	9
3.1	Scannende Ultraschallecho-Messung	9
3.1.1	Punkt- und Handmessung (Messlinien).....	9
3.1.2	Scannen mit äquidistantem Messraster	10
3.1.3	Linear-Array.....	10
3.2	Ermittlung der richtungsabhängigen Geschwindigkeiten und elastischen Konstanten.....	11
3.3	Modellierung der Ultraschallausbreitung	15
3.3.1	Modellierung der Ultraschallausbreitung für Abbildungszwecke	17
3.3.2	Dreidimensionale EFIT-Simulationen	20
3.4	Imaging mit Rekonstruktionsrechnung (Prinzip)	20
4	Ergebnisse der EFIT-Modellierung an Kiefer und Fichte	21
4.1	Elastische Wellenausbreitung in Fichte	21
4.2	Elastische Wellenausbreitung in Kiefer	23
4.3	3D-EFIT-Simulation bei Oberflächenanregung mit Fehlstelle	25
5	Weiterentwicklung der Abbildungssoftware (Rekonstruktion) im Rahmen des Vorhabens	30
5.1.1	Visualisierung	30
5.1.2	Datenvorverarbeitung (Preprocessing).....	30
5.1.3	Rekonstruktionsverfahren	32
5.1.4	Rekonstruktion von Linear Array-Daten.....	35
6	Ergebnisse an Probekörpern	38
6.1	Übersicht Probekörper	38
6.2	Ergebnisse für Buchenholz	41
6.3	Ergebnisse für Kiefernholz	43
6.4	Ergebnisse für Fichtenholz.....	50
7	Ergebnisse an realen Bauteilen	72
7.1	Brettschichtholzträger (Fichtenholz)	72
7.2	Anwendung an Bauwerken	76
7.2.1	Fußgängerbrücke Fabeckstraße	76
7.2.2	Balkone aus Brettschichtholz	89

8	Prüfungskatalog und Gerätekonzept	91
8.1	Zusammenstellung und Lösbarkeit von Prüfungsaufgaben.....	91
8.2	Gerätekonzept für die praxisgerechte Ultraschallprüfung.....	93
9	Zusammenfassung	96
10	Danksagung	98
11	Literatur	99

1 **Veranlassung und Ziel**

Im September 2009 wurde beim Bundesamt für Raumordnung im Rahmen der Ausschreibung Zukunft Bau der Antrag zum vorliegenden Vorhaben eingereicht und nach Einwerbung von Forschungspartnern und geändertem Finanzrahmen zum 01. August 2010 mit 2-jähriger Laufzeit bewilligt. Einschließlich einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung wurde das Vorhaben zum 31.01.2013 abgeschlossen.

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 praxisingerechten 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.

Im Rahmen der Forschungsarbeit stellte sich heraus, dass die erforderlichen Grundlagenuntersuchungen zur anisotropen Ultraschallausbreitung in Holz und die verschiedenen rechnerischen Ansätze zur Ultraschallabbildung einen größeren Anteil an der Arbeit erforderten, als bei der Beantragung angesetzt wurde. In Absprache mit der fachlichen Betreuung des Vorhabens und der wissenschaftlichen Arbeitsgruppe wurde der Aufwand für die verschiedenen Arbeitspakete im Arbeitsplan entsprechend modifiziert.

Bei der hier veröffentlichten Version handelt es sich im Wesentlichen um den Abschlussbericht zum Vorhaben, wie er in der Fraunhofer IRB-Datenbank veröffentlicht worden ist.

Weitere Teilergebnisse des Forschungsvorhabens sind seitdem wie folgt publiziert worden:

Krause, M., Mayer, K., Chinta, P. and U. Effner , Ultrasonic Imaging of Defects in Building Elements Made from Timber , Advanced Materials Research 778 (2013) pp. 312-320, Trans Tech Publications, Switzerland , 2013

Krause, M., Effner, U., Müller, S., Nowak. Th., Mayer, K. und P. Chinta , 3D-SAFT Imaging von Streuern in Brettschichtholz , In: Tagungsband der DGZfP Jahrestagung 2013, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Dresden, 06.-08.05.2013, DGZfP-Berichtsband BB 141-CD, Poster 8 , 2013

2 Einleitende Übersicht

2.1 Motivation

Es erscheint sinnvoll, zunehmend Holz als Baustoff zu verwenden. Dies ergibt sich aus der Nachhaltigkeit des Holzes als nachwachsendem 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.

Für die Herstellung von modernen Holzbauteilen (z. B. Brettschichtholz, Duo- und Trio-Balken, Brettsperrholz) werden bei der Fertigung im Werk aufwändige Methoden der Qualitätssicherung angewandt und es erfolgt eine anspruchsvolle Zertifizierung. Die Wichtigkeit dieser Maßnahmen ist durch in jüngster Zeit aufgetretene einzelne Mängel unterstrichen worden. Auch die Methoden der Bauwerksüberwachung sind in den letzten Jahren durch innovative zerstörungsfreie Prüfverfahren deutlich verbessert worden (Ultraschallecho, Radiographie). Dabei erfolgt die Prüfaussage jedoch in der Regel indirekt.

In dem Forschungsvorhaben wird die für Holz neue 3D-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, weil 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.

2.2 Ultraschallverfahren für Holzbauteile

Holz wird in seinen unterschiedlichen Bauprodukten in sehr vielfältiger Art und Weise angewendet, wobei es für alle Produkte einschlägige Normen, Richtlinien und Zulassungsbedingungen gibt. Die Perspektiven des Holzbaus sind beispielsweise in der High-Tech-Initiative "Holzbau der Zukunft" sehr fundiert dargestellt worden [7]. Die Anwendungsmöglichkeiten erweitern sich fortlaufend durch neue Bauprodukte sowohl aus Massivholz als auch aus Stammholz sowie in flächig verbauten Elementen (Brettschicht, Brettsperrholz und Verbundkonstruktionen) ([8] insbes. Teilprojekt 15, 2, 3).

Die Arbeiten des vorliegenden Forschungsvorhabens konzentrieren sich auf das Ultraschallecho-Verfahren für die zerstörungsfreie Prüfung der Holzbauteile. Für die theoretischen Grundlagen wird auf die grundlegende Literatur der anisotropen Schall- und Ultraschallausbreitung in Holzbauteilen zurückgegriffen. Zum Zusammenhang zwischen den elastischen Eigenschaften und den anisotropen Schallgeschwindigkeiten, unter anderem zur Qualitätskontrolle von Holzbauteilen in der Fertigung, sind hier umfangreiche Untersuchungen z. B. von Voichita Bucur [25], [27] und Sandy Schubert [20] durchgeführt worden. Es sind dort umfangreiche Tabellen über die Schallgeschwindigkeiten und Elastizitätsmoduli von zahlreichen Holzarten aufgeführt und die theoretischen Grundlagen ausführlich beschrieben.

Diese Grundlagen werden auch bei der Durchschallungsmessung an lebenden Bäumen angewendet und zeigen ansatzweise Erfolge bei der Ortung von Fehlstellen und mit Fäulnis befallenen Bereichen [21], [22], [23].

Das Durchschallungsverfahren wird teilweise im Sägewerk bei der Sortierung in Holzklassen angewendet.

Für den Nachweis der Qualität bzw. zur Lokalisierung von Schädigungen an Bauteilen werden zunehmend zerstörungsfreie und zerstörungsarme Prüfverfahren erforscht und angewandt [9], [11]. Diese Verfahren stellen einen großen Fortschritt dar. Bisher ermöglichen diese Verfahren wegen der akustisch anisotropen Eigenschaften noch keine dreidimensionale Auflösung, so wie es für die Untersuchung von Betonbauteilen bereits Stand der Technik ist [12].

Wesentliches Prinzip dieser Art der aktuellen Ultraschallecho-Prüfung ist das Auffinden von auffälligen Bereichen über die Abschattung einer ansonsten deutlichen Anzeige des Rückwandechos. In den meisten Fällen werden diese Bereiche mit der Bohrwidstandsmethode näher untersucht. Eine aktuelle Zusammenstellung von Anwendungen des Ultraschallechoverfahrens an Holzbauteilen findet man in [13].

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde das Ultraschallechoverfahren unter Verwendung von trocken ankoppelnden Prüfköpfen mit dem Ziel der Qualitätsprüfung von Klebefugen in Brettschichtholz angewendet. Es wird über eine deutliche direkte Reflexionsanzeige von großen Fehlverklebungen mit getrennt angeordneten Prüfköpfen berichtet [14], [15], [16], [17]. Diese Ergebnisse waren zu Beginn der vorliegenden Forschungstätigkeit noch nicht veröffentlicht.

Ultraschall-Echomessungen wurden auch bereits an Laubhölzern durchgeführt [18]. Es konnten dabei Fehlstellen und Äste nachgewiesen werden. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse von Laub- auf Nadelhölzer ist nur im begrenzten Umfang möglich, da der Aufbau der Hölzer sich unterscheidet.

Rekonstruktionsrechnungen und die Modellierung der Ultraschallausbreitung für anisotrope Werkstoffe (z. B. austenitischer Stahl) sind bekannt. Die grundlegenden Arbeiten zum Aufbau eines entsprechenden Programmpaketes für Holz ist zu Beginn des Vorhabens vorhanden, jedoch noch ohne reale Anwendungstests oder eine Validierung [19]. Im Rahmen des Vorhabens wurde die Anpassung des Programms für die Rekonstruktionsrechnungen (intersaft) an Holz vorgenommen und wird in den Kapiteln 3.4, 4 und 5 näher erläutert.

2.3 Aufgabenstellung, Ziele und Vorgehensweise

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. Ergänzend zu den bereits bekannten Möglichkeiten der Schadensdiagnose für Holzbauteile mit Ultraschall und Radiographie soll herausgefunden werden, welche Fehler und Störungen in welcher Art von Holzbauteilen geortet und klassifiziert werden können.

Das neu entwickelte 3D-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 zerstörungsarmen Verfahren erfolgen.

Für eine gute Abbildung - angestrebt wird hier eine laterale und Tiefenauflösung von 20 mm - müssen sowohl die Beträge der richtungsabhängigen Geschwindigkeiten bestimmt werden, als auch die ausgezeichneten Symmetrierichtungen für das konkrete Bauteil bekannt sein. Hierfür werden neue Lösungsansätze erprobt.

In verschiedenen Versuchsreihen wird ein Leistungskatalog angestrebt, für welche Prüfaufgaben das Verfahren konkret geeignet ist und welche Aussagesicherheit erreicht werden kann. Notwendige Verfahrensverbesserungen werden benannt und, wenn bereits im

Rahmen dieses Projektes möglich, realisiert. Darüber hinaus werden die Anforderungen zusammengestellt, die eine praxismgerechte Gerätelinie zur bildgebenden Ultraschallprüfung von Holzbauteilen sinnvollerweise erfüllen sollte.

Das neu entwickelte Auswerteprogramm zur Auswertung von Ultraschallecho-Messungen von Holzbauteilen wird schrittweise für die dreidimensionalen Strukturanalyse herangezogen und weiterentwickelt. Wesentlich für eine gute Prüfaussage ist dabei die Kenntnis der elastischen Konstanten des Bauteils, und zwar bezogen auf die drei Symmetrierichtungen. Speziell für diesen Punkt stellte sich im Rahmen der Arbeit heraus, dass für die Lösung dieser Aufgabe wesentlich mehr Grundlagen der Schallausbreitung in Holzbauteilen erarbeitet werden mussten, als ursprünglich angenommen.

Gemäß Forschungsantrag ist der Forschungsansatz vierstufig:

1. Herstellung von homogen anisotropen Bauteilen und Referenzmessungen
2. Einbringung von künstlichen Reflektoren (Spezifizierung erfolgt in der Orientierungsphase)
3. Bauelemente aus der Praxis mit und ohne Auffälligkeiten (von kooperierenden Instituten und Firmen)
4. Reale Bauwerke

Der erste Teil des Vorhabens beschäftigt sich mit der Herstellung geeigneter Probekörper und entsprechenden Referenzmessungen.

Die Optimierung des Verfahrens erfolgt zunächst an Probekörpern mit künstlich eingebrachten Fehlstellen. Entscheidend für den Nachweis der Praxistauglichkeit des Verfahrens ist die Abbildung dieser Fehlstellen, aber auch das Erkennen bzw. die Unterdrücken von Störanzeigen, wie sie bei jedem Prüfverfahren auftreten können. Beispiele dafür sind Materialinhomogenitäten und geometrische Randeckeffekte. Speziell bei Brettschichtholz kommt hier der Einfluss der Leimfugen dazu.

Als dritte Stufe der Entwicklung erfolgen Prüfungen an realen Bauteilen. Praxisnahe Testobjekte stellen die TU München und andere Kooperationspartner zur Verfügung.

Aus den Untersuchungen ergibt sich ein erster Katalog lösbarer Prüfaufgaben. Notwendige Modifizierungen der Messapparaturen und AuswerteprozEDUREN werden entsprechend den Möglichkeiten ausgeführt und getestet.

Für die Experimente ist ein mehrstufiges Vorgehen vorgesehen:

Das Arbeitsprogramm ist in 6 Arbeitspakete gegliedert

- AP1 Bauelemente, Holzarten und typische Schadensbilder
- AP2 Entwicklung und Validierung der Messstrategie und der bildgebenden Auswertung: Labormessungen und Auswertung an Probekörpern mit definiert eingebrachten Fehlstellen
- AP3 Optimierung der Vorgehensweise für reale Bauteile
- AP4 Praxisanwendungen im Feldversuch an Bauwerken
- AP5 Aufstellung bearbeitbarer Prüfaufgaben und der Bewertung
- AP6 Entwicklung eines Gerätekonzeptes einschl 3D-Bildgebung

2.3.1 Forschungsförderer und begleitende Arbeitsgruppe

Die Arbeit wird von zwei Ingenieurbüros, einem Hersteller und dem Eigenanteil der beteiligten Forschungsinstitute unterstützt. Die beteiligten Förderer sind

Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Ingo Dreger
14532 Klein-Machnow

Planungsgruppe Geburtig
99423 Weimar

ACSYS (Acoustic Control Systems)
Moskau, Russland
Dr. A. Samokrutov

Auf Vorschlag des Projektleiters wurden nachfolgend aufgelistete Persönlichkeiten für die begleitende Arbeitsgruppe eingeladen. Sie begleiteten das Vorhaben auf den beiden zentralen Arbeitstreffen, der Vermittlung von Testobjekten und die Durchsicht der Berichte (Zwischenbericht, Statusbericht, Abschlussbericht).

Dr. G. Dill-Langer
MPA Stuttgart

Frau Prof. K. Frühwald
Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Labor für Holzbauprodukte und Holzproduktion
32657 Lemgo

Prof. H. Kreuzinger
Prüfingenieur für Baustatik: Massivbau und Holzbau
81243 München

Neben den zahlreichen Arbeitstreffen zwischen der BAM und den Partnern der Universität Kassel fanden zwei gemeinsame Sitzungen mit der begleitenden Arbeitsgruppe, den Förderern und dem Fachbetreuer des BBRS statt (im März 2011 und im September 2012). Inhalt waren der Bericht und die Diskussion von Zwischenergebnissen, Hinweise zum weiteren Vorgehen, die Konzeption von Probekörpern und die Anwendbarkeit für reale Bauteile. Der Entwurf des Abschlussberichtes wurde von allen Partnern und der begleitenden Arbeitsgruppe durchgesehen und zahlreiche wichtige Hinweise in die Endfassung eingearbeitet.

3 Methoden und Verfahren

3.1 Scannende Ultraschallecho-Messung

3.1.1 Punkt- und Handmessung (Messlinien)

Das Gerät A1220 Monolith [1], [2], [3] ist ein Niederfrequenz-Ultraschallgerät zur Dickenmessungen von Betonbauteilen. Durch Abtastung größerer Messfelder ist auch eine Fehlstellenortung im Beton bzw. Holz möglich. Es arbeitet mit Arrays bestehend aus Punktkontaktprüfköpfen, die Transversalwellen bzw. Longitudinalwellen aussenden und empfangen. Jeweils 12 parallel geschaltete Prüfköpfe arbeiten als Sender bzw. als Empfänger.

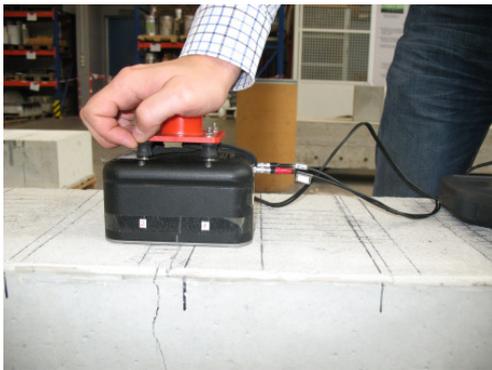


Bild 1 Anordnung der Messapparatur A1220 Monolith

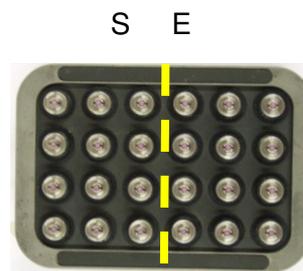


Bild 2 Array-Prüfkopf A1220

Die Handmessung wird in der Regel dann eingesetzt, wenn nur eine Linie von Messpunkten aufgenommen werden soll (B-Bild-Auswertung) oder es wird zur für Übersichtsmessungen verwendet.

Die in den Array-Prüfköpfen verarbeiteten Messköpfe sind auch als einzelne Messköpfe verwendbar.



Bild 3 Einzelne Prüfköpfe für Longitudinalwellen bzw. Transversalwellen



Bild 4 Laufzeitapparatur 2 für die Messung mit Einzelprüfköpfen

Mittels der Laufzeitapparatur 2 können Einzelprüfköpfe angesteuert werden. Mittels eines Funktionsgenerators und eines Rechtecksenders, können Signale für die Longitudinalwellen-Prüfköpfe von 100 kHz und für die Transversalwellen-Prüfköpfe von 55 kHz generiert werden. Die Apparatur kann für Messungen im Echo-Mode oder in Durchschallung eingesetzt werden.

3.1.2 Scannen mit äquidistantem Messraster

Werden größere Flächen untersucht, wird der Prüfkopf in ein scannendes System eingebaut. Es ist für die gleichen Array-Prüfköpfe konzipiert wie auch das A1220 Monolith. Als Prüfköpfe können Transversalwellen-Prüfköpfe bei einer Frequenz von 25 bis 75 kHz und Longitudinalwellen-Prüfköpfe bei einer Frequenz von 75 bis 100 kHz eingesetzt werden.



Bild 5 Das scannende System mit einem Transversalwellen-Prüfkopf. Rechts: PXI-System zur Steuerung der Scaneinheit

Die automatisierten Messungen erlauben das Abscannen größerer Flächen, hier z.B. eines kompletten Holz-Probekörpers.

Der Array-Messkopf verfügt über 24 Einzelprüfköpfen, die so verschaltet sind, dass jeweils 12 Prüfköpfe als Sender arbeiten und 12 als Empfänger (12x12 Array).

Für eine bessere Auflösung der Empfangssignale wurde noch die Verschaltungen 4x4 Prüfköpfen und zum Schluss noch mit einem 1+1-Array gearbeitet. Die meisten Messungen wurden dann mit dem 1+1-Array durchgeführt, da hier die besten Ergebnisse erzielt wurden. Für die Auswertung mit FT-SAFT erwies sich diese Konfiguration als diejenige mit der besten Auflösung.

3.1.3 Linear-Array

Das Linear-Array ist unter dem Namen „MIRA“ kommerziell erhältlich (s. Bild 6). Bei diesem Gerät sind bis zu 16 Prüfkopfmodule entlang einer Linie angeordnet (in Bild 6 sind es 10). Diese Module werden sequentiell so angesteuert, dass jedes Modul einmal als Sender (wobei alle anderen Module parallel als Empfänger agieren) und sonst als Empfänger arbeitet (s. Bild 7). So erhält man bei einer Messung mehrere Messkurven aus unterschiedlichen Sender- und Empfängerpositionen, aus denen mit geeigneter Software ein zweidimensionales B-Bild rekonstruiert werden kann [4].

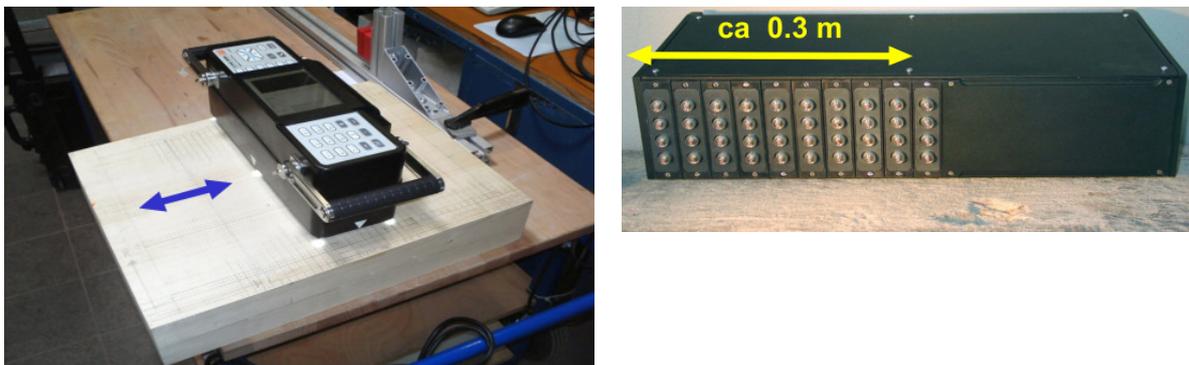


Bild 6 Messanordnung für das Lineararray an einem Fichteholzprobekörper, Polarisationsrichtung: senkrecht zur

Jedes Prüfkopfmodul besteht aus vier Einzelprüfköpfen, die mit Transversalwellen arbeiten. Die Transversalwellen sind dabei senkrecht zur Array-Achse polarisiert.

Die Prüfkopfmodule sind über ein Bus-System mit einem in das Messgerät eingebauten Controller verbunden. Auf den Prüfkopfmodulen befinden sich Sendeeinheiten und Analog-Digital-Umsetzer, die die empfangenen Messsignale digitalisieren und dann an den Controller übergeben. Die Verbindung zum Computer, der die Messung steuert und die Messdaten abrufen und auswertet, erfolgt über ein Netzkabel.

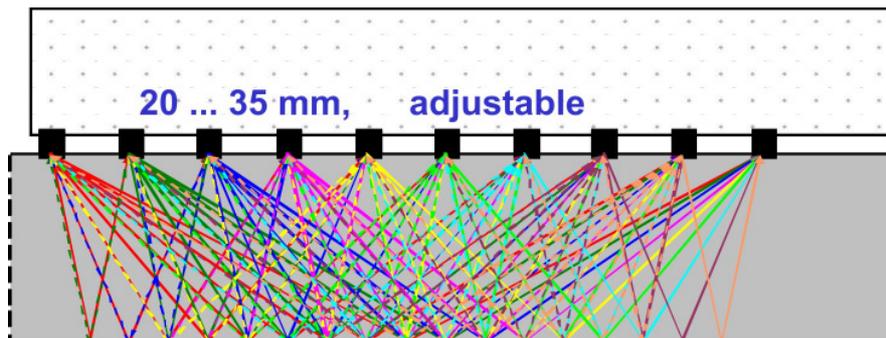


Bild 7 Messprinzip der Echo-Messung des Lineararrays

Das Linear-Array wird senkrecht auf die Probekörperoberfläche angekoppelt (s. Bild 6) und die Messung gestartet. Aus den einzelnen Messsignalen werden die Ultraschallrückstreuung bzw. Reflexionen des Volumens unter der Messfläche berechnet. Die Ergebnisse sind als Schnitte bzw. Projektionen darstellbar, bei denen die Amplitude der Rückstreuung bzw. Reflexionen farbkodiert dargestellt wird [5].

3.2 Ermittlung der richtungsabhängigen Geschwindigkeiten und elastischen Konstanten

Bestimmung der Geschwindigkeiten in Kiefernholz (Beispiel)

An den Kiefernholz-Probekörpern aus Bild 33 wurden Ultraschall-Transmissions-Messungen vorgenommen, um die Geschwindigkeiten in den verschiedenen Symmetrierichtungen zu bestimmen und mit den Literaturwerten nach [25] zu vergleichen. Die Messungen wurden mit Punktkontaktprüfköpfen durchgeführt. In alle drei Symmetrierichtungen wurde je eine Messung mit Longitudinalwellenprüfköpfen und zwei Messungen mit Scherwellenprüfköpfen, entsprechend beider Polarisationsrichtungen, vorgenommen. Bild 8 zeigt beispielhaft eine Ultraschall-Zeitkurve (A-Bild) für die Durchschallung in radialer Richtung und die Polarisation der Scherwellen in Längs- (axialer) Richtung (Index RL). Der Stern markiert die theoretische Laufzeit nach [25], doch nicht alle Geschwindigkeiten lassen sich so gut bestimmen: Wie in Bild 9 zu sehen ist (Schallrichtung tangential, Polarisationsrichtung radial, Index TR), bildet sich nicht immer ein eindeutiges Maximum aus.

Der Einfachheit halber wurde zuerst in den drei Symmetrierichtungen gemessen und die A-Bilder ausgewertet.

Die Ultraschallzeitkurven wie in Bild 8 und Bild 9 dargestellt, machen bereits deutlich, dass eine exakte Bestimmung des Einsatzpunktes und somit der Laufzeit schwierig bis kaum möglich ist. Die aus den drei Symmetrierichtungen ermittelbaren Geschwindigkeiten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

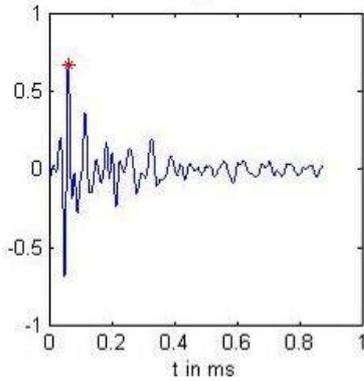


Bild 8 Laufzeitkurve C_{RL}

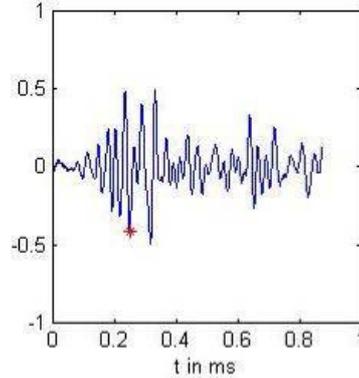


Bild 9 Laufzeitkurve C_{TR}

Tabelle 1 zeigt den Vergleich zwischen theoretisch und experimentell ermittelte Werte für alle möglichen Geschwindigkeiten. Dabei ist zu beachten, dass die Literaturwerte mit einer Frequenz von 500 kHz bestimmt wurden, die Messungen im Rahmen dieser Arbeit aber mit einer Frequenz von 50 kHz (Scherwellen) bzw. 100 kHz (Longitudinalwellen) durchgeführt wurden. Für die vorliegende Arbeit sollten die Geschwindigkeiten mit denselben Prüfköpfen erfolgen, wie sie auch für die Echo-Experimente verwendet wurden.

Tabelle 1 Vergleich der Literaturwerte nach [25] für $f = 500$ kHz mit den experimentell bestimmten Geschwindigkeiten an Kiefer ($f = 50$ kHz bzw. 100 kHz). Der 1. Index bezeichnet die Schallrichtung, der 2. Index die Polarisisation)

	V_{theo} in m/s	V_{mess} in m/s	Abweichung in %
V_{RL}	1500	1467,74	-2
V_{RT}	500	366,94	-27
V_{TL}	1300	1333,33	3
V_{TR}	500	527,66	6
V_{LR}	1400	1363,64	-3
V_{LT}	1200	1256,54	5
V_{RR}	2500	1895,83	-24
V_{TT}	1500	1362,64	-9
V_{LL}	5000	5647,06	13

Aufgrund der Inhomogenität der Holzprobekörper ist das Bestimmen der Laufzeit nur eingeschränkt möglich (siehe Bild 9). Zusätzlich erschweren auftretende Oberflächenwellen eine Ermittlung des Einsatzpunktes der Wellenpulse.

Die genaue Bestimmung der Laufzeit ist nur bei den Messungen mit Longitudinalwellen möglich, da hier der Ersteinsatz des Wellenpulses abgelesen werden kann.

Bei Messungen mit Transversalwellen-Prüfköpfen ist eine Durchschallung in T- bzw. R-Richtung bei gleichzeitiger Polarisierung in L-Richtung (Faserrichtung) wesentlich geeigneter

für die Auswertung der Ultraschall-Zeitkurven (A-Bilder), als bei einer Polarisation senkrecht zur Faserrichtung. Außerdem ist bei der Anregung von Transversalwellen zu beachten, dass der anregende Prüfkopf aus prinzipiellen Gründen zusätzlich Longitudinalwellenanteile erzeugt. Zusätzlich enthält die gemessene Ultraschall-Zeitkurve wegen der Streuungen und Wellenmoden-Umwandlungen eine Überlagerung von vielen Streuanzeigen, wie am Beispiel von Bild 9 zu erkennen ist. Dadurch ist eine objektive Bestimmung der Geschwindigkeit mit den für die Echomessung verwendeten Prüfköpfen nicht möglich.

Für die Modellierungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit und die Validierung der ersten Version des Rekonstruktionsprogramms inter-saft wurden im Wesentlichen die Geschwindigkeiten aus der Literatur angenommen (Kapitel 4). Wie man im Prinzip die elastischen Konstanten (Steifigkeitstensor) aus der Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten in verschiedene Richtungen bestimmen kann, ist nachfolgend beschrieben. Für die Rekonstruktionsrechnungen für die Auswertung der Experimente wurden zusätzliche Module zur Bestimmung auch der schiefwinkligen Ausbreitungsgeschwindigkeiten am Objekt entwickelt (Kapitel 5).

Bestimmung des Steifigkeitstensors

Zur Bestimmung aller nötigen Elemente des Steifigkeitstensors sind 4 Probekörper notwendig (Bild 10). Diese müssen in bestimmten Richtungen zugeschnitten werden.

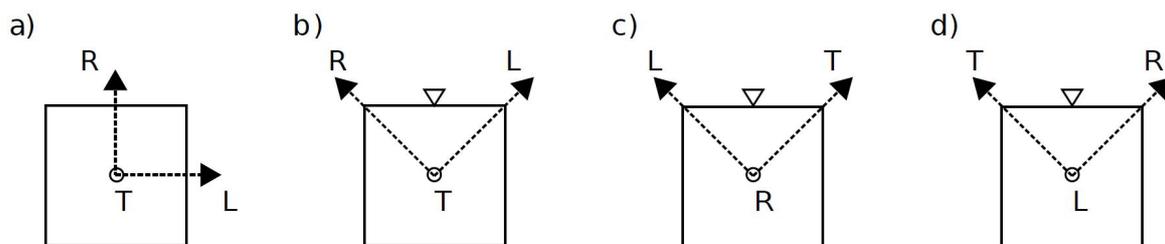


Bild 10 4 Probekörper zur Bestimmung der nötigen Geschwindigkeiten

Der Probekörper in Bild 10 a) dient zur Berechnung der Hauptdiagonalelemente nach [25]. Dabei werden in den Hauptsymmetrien alle möglichen Geschwindigkeiten gemessen und die Hauptdiagonalelemente wie folgt berechnet:

$$C_{11} = v_{LL}^2 \cdot \rho \quad (1)$$

$$C_{22} = v_{RR}^2 \cdot \rho \quad (2)$$

$$C_{33} = v_{TT}^2 \cdot \rho \quad (3)$$

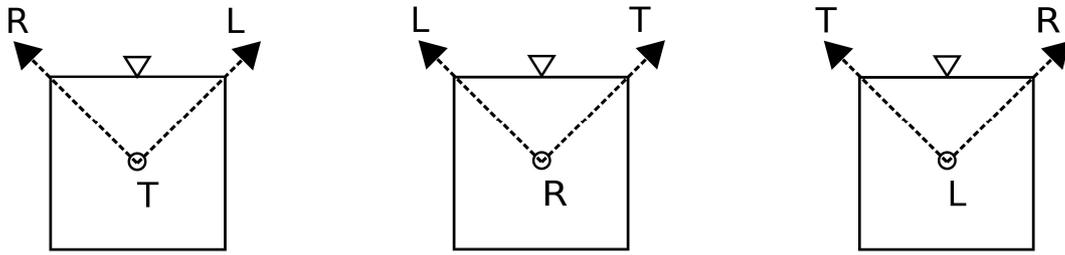
$$C_{44} = (v_{TR}^2 + v_{RT}^2) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (4)$$

$$C_{55} = (v_{LT}^2 + v_{TL}^2) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (5)$$

$$C_{66} = (v_{LR}^2 + v_{RL}^2) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (6)$$

Die Messungen für die Nebendiagonalelemente und deren Berechnung sind etwas komplizierter (nach [26]). Es werden 3 Probekörper benötigt, die jeweils im 45°-Winkel zu

den Symmetrieachsen zugeschnitten sind (Bild 11). Die Messung erfolgt in der mit dem Dreieck gekennzeichneten Richtung.



Bestimmung von C_{12}

Messung von:

$v_{\text{Longitudinal}} (v_{10})$

$v_{\text{Transversal}}$ polarisiert in LR-Ebene (v_{11})

Bestimmung von C_{13}

Messung von:

$v_{\text{Longitudinal}} (v_{13})$

$v_{\text{Transversal}}$ polarisiert in LT-Ebene (v_{14})

Bestimmung von C_{23}

Messung von:

$v_{\text{Longitudinal}} (v_{16})$

$v_{\text{Transversal}}$ polarisiert in RT-Ebene (v_{17})

Bild 11 Probekörper für die Messung und Berechnung der Nebendiagonalelemente

C_{12}

$$\rho v_{10}^2 = 0.5 C_{66} + 0.25(C_{11} + C_{22}) + 0.5[(C_{12} + C_{66})^2 + 0.25(C_{11} - C_{22})^2]^{1/2} \quad (7)$$

$$\rho v_{11}^2 = 0.5 C_{66} + 0.25(C_{11} + C_{22}) + 0.5[(C_{12} + C_{66})^2 + 0.25(C_{11} - C_{22})^2]^{1/2} \quad (8)$$

C_{13}

$$\rho v_{13}^2 = 0.5 C_{55} + 0.25(C_{11} + C_{33}) + 0.5[(C_{13} + C_{55})^2 + 0.25(C_{11} - C_{33})^2]^{1/2} \quad (9)$$

$$\rho v_{14}^2 = 0.5 C_{55} + 0.25(C_{11} + C_{33}) + 0.5[(C_{13} + C_{55})^2 + 0.25(C_{11} - C_{33})^2]^{1/2} \quad (10)$$

C_{23}

$$\rho v_{16}^2 = 0.5 C_{44} + 0.25(C_{22} + C_{33}) + 0.5[(C_{23} + C_{44})^2 + 0.25(C_{22} - C_{33})^2]^{1/2} \quad (11)$$

$$\rho v_{17}^2 = 0.5 C_{44} + 0.25(C_{22} + C_{33}) + 0.5[(C_{23} + C_{44})^2 + 0.25(C_{22} - C_{33})^2]^{1/2} \quad (12)$$

Aus Symmetriegründen gilt: $C_{21}=C_{12}$, $C_{31}=C_{13}$ und $C_{32}=C_{23}$.
Alle weiteren Einträge von C sind 0.

Symbole

C_{ii}	Element des Steifigkeitstensors
L	Längsrichtung, Faserrichtung
R	Radialrichtung
T	Transversalrichtung
v_{ii}	Geschwindigkeit in entsprechende Richtung
ρ	Dichte

Wie oben erläutert, ist die Ermittlung der Laufzeiten mittels schiefwinkliger Probekörper prinzipiell möglich, jedoch aufgrund der Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Laufzeiten im für die Echomessungen verwendeten Frequenzbereich (Niederfrequenzbereich) nicht erfolgreich. Es können nur die Ersteinsätze der Wellenpulse zweifelsfrei bestimmt werden. Außerdem schwanken die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Holz individuell ziemlich stark. Aus diesen Gründen wurden die materialtypischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den meisten Fällen direkt am Objekt bestimmt und angepasst.

3.3 Modellierung der Ultraschallausbreitung

Für die zerstörungsfreie Prüfung von geschichtetem Holz mit Ultraschall ist das Verständnis der elastischen Wellenausbreitung von ausschlaggebender Bedeutung. Viele Autoren haben sich mit der Wellenausbreitung in Holz als Spezialfall der Wellenausbreitung in anisotropen Materialien beschäftigt. Hierbei ist das Werk von V. Bucur [27] zu betonen, in dem ein sehr breites Spektrum an Grundlagen für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung von Holz mit Ultraschalltechniken aufgearbeitet wurde. Für den Einsatz von Abbildungsverfahren basierend auf SAFT (s. Kapitel 5) ist es erforderlich, das ungestörte Hintergrundmedium möglichst gut zu beschreiben, da Abbildungsverfahren wie SAFT nur zur Lokalisation von Streuern in bekanntem Hintergrundmedium herangezogen werden können - die Bestimmung der Materialparameter ist nicht im Algorithmus enthalten. SAFT basiert auf der Überlagerung von Elementarwellen. In elastischen Medien treten jedoch verschiedene Wellentypen auf, deren Komplexität - ersichtlich an der Form der Geschwindigkeitsprofile - sich bei anisotropen Materialien noch weiter erhöht. Von großer Bedeutung ist dabei, dass bei Reflexionen an Materialinhomogenitäten Modenkonzersion auftritt. D. h., es entstehen Wellen mit unterschiedlichen Polarisierungen und Ausbreitungsgeschwindigkeiten, die zu unterschiedlichen Zeiten am Empfänger ankommen und nur schwer - oder überhaupt nicht - voneinander zu trennen sind. Diese Modenkonzersion und auch Mehrfachreflexionen führen zu Signalen, die durch Abbildungsalgorithmen wie SAFT falsch zugeordnet werden, was sich durch Geisteranzeigen (Artefakte) im Rekonstruktionsergebnis widerspiegelt. Es ist daher unerlässlich, sich über den Signalverlauf anhand von Simulationen der Wellenausbreitung im Vorfeld Klarheit zu verschaffen. Die für das Projekt erforderlichen Simulationen wurden mit der an der Universität Kassel entwickelten EFIT Methode [28], [29] durchgeführt, die für den dreidimensionalen anisotropen Fall für Holz mit entsprechenden absorbierenden Randbedingungen von P. K. Chinta [30] erweitert wurde.

Die Simulationen basieren auf der Annahme, dass sich Holz stückweise durch eine orthotrope Anisotropie beschreiben lässt, wobei die Materialparameter in ausgedehnten Raumgebieten als konstant angenommen werden können. Um die gekrümmte Struktur der Jahresringe nachzubilden, wäre eine räumliche Verteilung der anisotropen Parameter

denkbar, wurde aber hier nicht angewendet, da der verwendete Abbildungsalgorithmus diese Feinstruktur nicht berücksichtigen könnte.

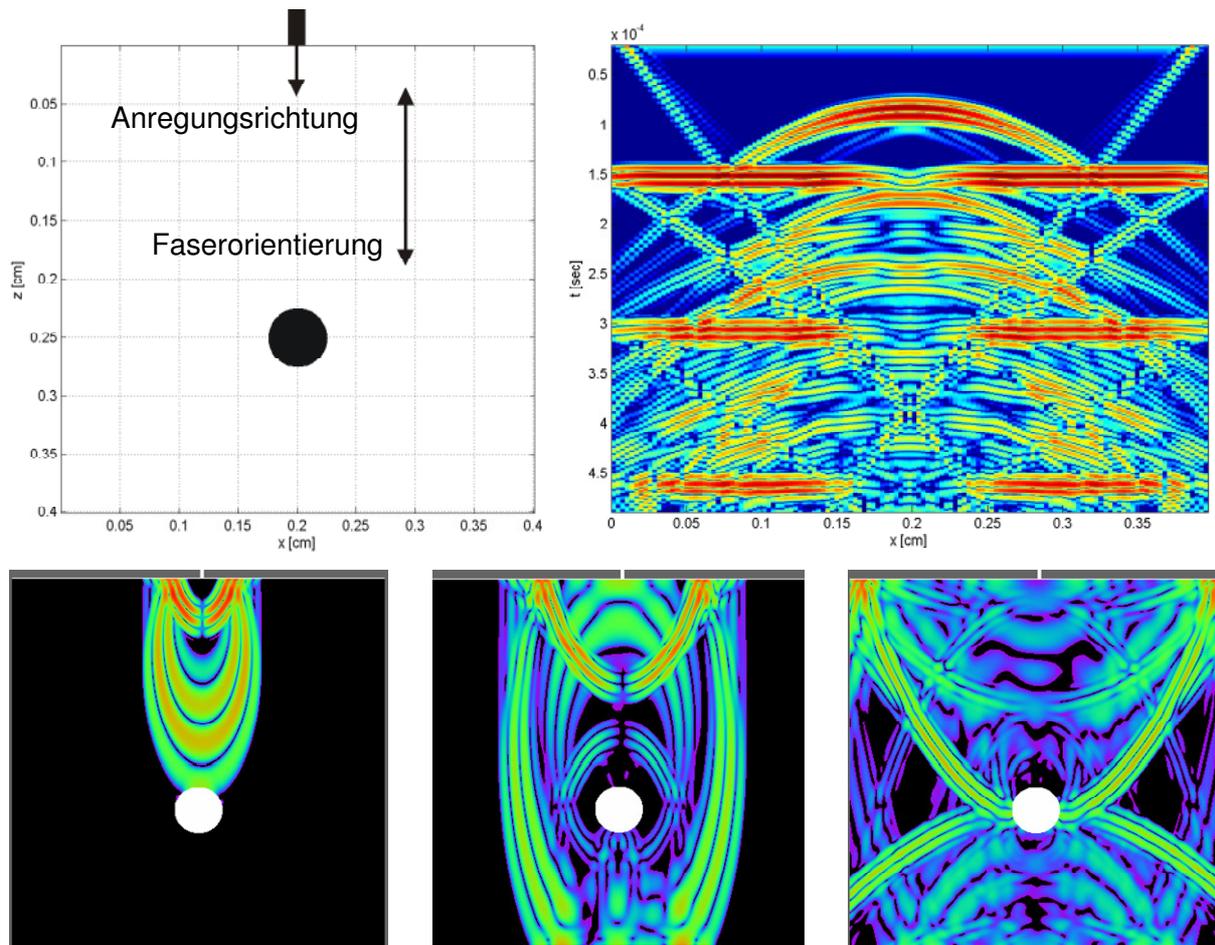


Bild 12 Illustration einer 2D-EFIT-Simulation an einem Beispiel: Punktförmige Normalanregung (LL: Anregung und Polarisationsrichtung in Faserrichtung) eines homogen anisotropen Mediums mit den Materialeigenschaften von Fichte nach Bucur [25]. Anregung in Faserrichtung ($z \sim L$, $x \sim R$). Rechts oben: Messdaten gewonnen durch Scannen in x-Richtung entlang der Oberfläche (z-Komponente der Teilchenschnelle v) Darstellung als Ultraschall B-Bild. Unten: Drei Momentaufnahmen des Wellenfeldes aus einer EFIT Modellierung ($|v|$) mit Reflexionen am Streuer und an der Rückwand. Anregung mit einem breitbandigen Puls (RC2 Puls) der Mittenfrequenz 55 kHz.

Die Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) beruht auf der Diskretisierung der linearen elastodynamischen Grundgleichungen nach dem Schema der Finiten Integration, wie sie für elektromagnetische Wellen entwickelt wurde [31]. Die Grundgleichungen beschreiben das Verhalten von Masseteilchen in einem elastischen Kontinuum unter der Einwirkung von Kräften. Die elastischen Eigenschaften sind durch den Steifigkeitstensor (Tensor vierter Stufe) beschrieben, der in das Hookesche bzw. das Cauchy-Hookesche Gesetz eingeht und den tensoriellen Zusammenhang zwischen Spannungstensor und Deformationstensor wiedergibt. Der Steifigkeitstensor kann wegen Symmetrien und unter Berücksichtigung des elastodynamischen Energiesatzes auf 21 unabhängige Konstanten zurückgeführt werden, deren Zahl sich bei gegebenen Materialeigenschaften weiter reduzieren lässt, sodass bei isotropen Materialien schließlich zwei unabhängige Größen, bei transversalisotropen Materialien 5 unabhängige Größen und bei orthotropen Materialien 9 unabhängige Größen übrig bleiben. Die zweite Grundgleichung ist die Cauchysche Bewegungsgleichung, die die Impulsänderung von Masseteilchen in einem Kontinuum aufgrund von inneren Spannungen in Form des Cauchyschen Spannungstensors und durch äußere Kräfte beschreibt. Die Diskretisierung erfolgt in einem versetzten kubischen

Gitter, wobei die tensoriellen Feldkomponenten so angeordnet sind, dass sich Rand- und Übergangsbedingungen mittlungsfrei integrieren lassen. Das Verfahren liefert, ausgehend von einer Anregungsfunktion für eine verteilte Quelle an der Oberfläche oder im Raum, die davon ausgehenden Wellenfelder in zwei oder drei Dimensionen in einem diskreten Zeitraster, sodass sich die Feldverteilung - dargestellt als Momentaufnahmen oder als Filme - und Zeitverläufe der Feldkomponenten an der Oberfläche - abgespeichert als A- oder B-Bild-Datenfeld - für die Weiterverwendung in Rekonstruktionsalgorithmen und zur Visualisieren gewinnen lassen. Ein typisches Anwendungsbeispiel findet man in Bild 12, es sind Momentaufnahmen und das B-Bild für eine monostatische Messaufnahme der Streuung an einem Lufteinschluss dargestellt.

3.3.1 Modellierung der Ultraschallausbreitung für Abbildungszwecke

Im Rahmen des Projektes wurde eine Reihe von Simulationen durchgeführt, um die Grenzen und Möglichkeiten des anisotropen Abbildungsverfahrens zu evaluieren. Hierzu wurden verschiedene Anregungssituationen und verschiedene Streugeometrien angenommen. Die Simulation zur Erzeugung von Messdaten ist sehr rechenzeitintensiv, da für jeden Sendepunkt einer scannenden Messung eine Simulation des gesamten Gebiets durchgeführt werden muss. Diese Simulationen sind daher nur zweidimensional möglich, wobei wir uns auf Simulationen in einer der Kristallebenen beschränken. Eine 2D-Simulation von Nicht-Vorzugsebenen würde wegen der Anisotropie zur Wellenausbreitung aus der Ebene heraus führen, was dann nicht mehr korrekt erfasst werden könnte. Als ausgewähltes Beispiel führen wir das Ergebnis der oben gezeigte 2D-EFIT-Simulation von Fichte nach Bucur weiter aus und betrachten die Ergebnisse der SAFT-Rekonstruktion. Als Ergebnis einer Rekonstruktion von synthetisch gewonnenen Daten - alle Materialparameter sind bekannt - erwartet man eine perfekte Abbildung der Fehlstelle, in diesem Fall ein zylinderförmiger Streuer (Loch) in einer Tiefe von 23 cm. Aufgrund der extremen Anisotropie der qP-Welle in L-Richtung gelingt dies jedoch nicht sofort. Der gewöhnliche SAFT-Algorithmus - bezogen auf ein isotropes Hintergrundmedium - zeigt uns ein Ergebnis, wie es in Bild 13c dargestellt ist: Die Rückwand des Probeköpers ist an der richtigen Stelle, aber die Rekonstruktion zeigt an der erwarteten Stelle für das Loch nur einen groben verschwommenen Bogen. Die Fokussierung hat nicht funktioniert! Ersetzt man das Geschwindigkeitsprofil für die SAFT-Rekonstruktion (Bild 13b) durch die aus der Theorie für die bekannten Materialparameter berechenbare Gruppengeschwindigkeit für die qP-Welle (Bild 13d, Bild 13e), so ergibt sich tatsächlich die durch den Ultraschall 'beleuchtete' Oberkante des Zylinders sowie eine Schattenzone in der Rückwandanzeige (Bild 13f).

Betrachtet man die 2D-EFIT-simulierte Wellenfront in Bild 12 (unten links), so erkennt man eine Einschnürung in der schnellen Welle in horizontaler Richtung, was sich nicht in der qP-Gruppengeschwindigkeit abzeichnet. Man muss daher die wichtige Erkenntnis ableiten, dass die Gruppengeschwindigkeitsdiagramme zwar die potenzielle Anwesenheit einer Welle angeben, aber die tatsächlich auftretende Intensität mit der Anregungspolarisation zusammenhängt, sodass - wie in diesem Fall - die qP-Welle nahtlos in eine quasi-Scherwelle übergeht, was sich so aus der Ebenen-Wellenbetrachtung, aus der die Geschwindigkeitsdiagramme hergeleitet werden, nicht erschließt. Für die praktische Messtechnik ist der beschriebene Fall eher weniger relevant, da eine longitudinale Anregung in L-Richtung wegen der Zugänglichkeit und der Größe der möglichen Messfläche eher ungewöhnlich ist. Die Auflösungsqualität wäre aber laut dem untersuchten Beispiel als gut zu vermuten.

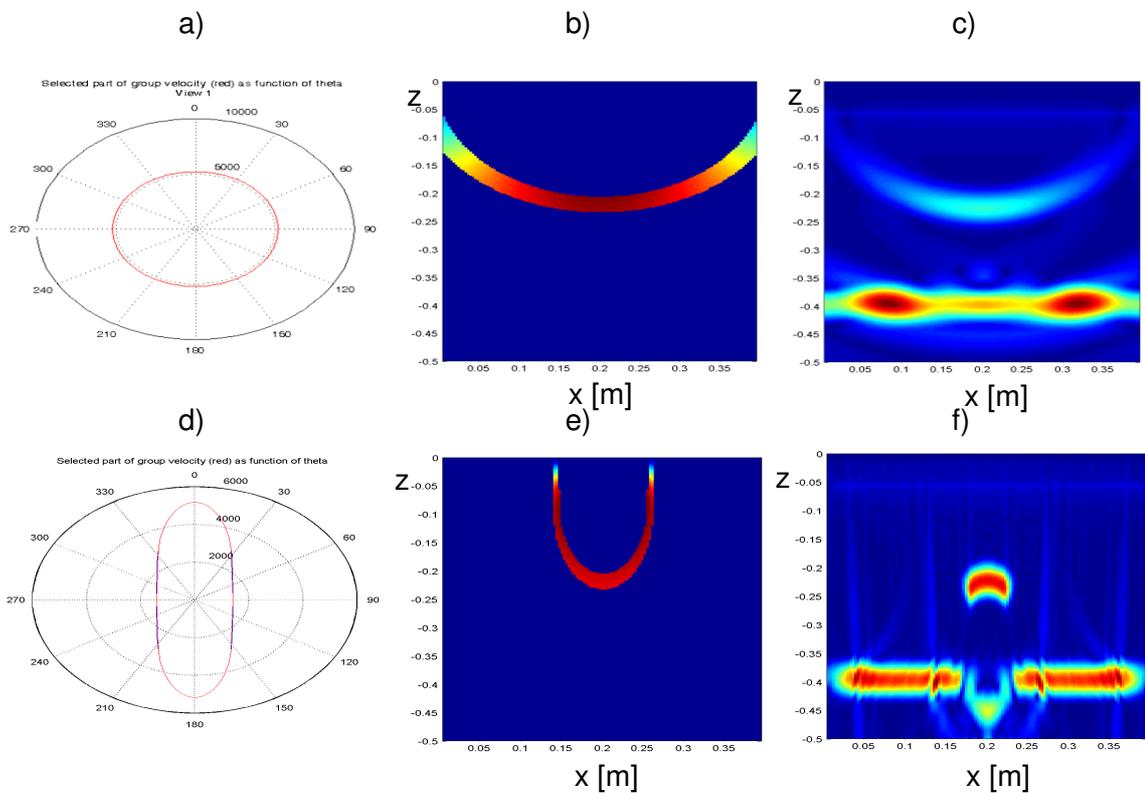


Bild 13 a), b): Isochrone für isotropes Geschwindigkeitsprofil, c): Isotrope SAFT-Rekonstruktion der simulierten Messdaten, d): Gruppengeschwindigkeitsdiagramm der qP-Welle aus der Theorie, e): Isochrone für anisotropes SAFT, f): anisotrope SAFT-Rekonstruktion der simulierten Messdaten

Für die Anwendung an Probekörpern ist der nächste Fall relevant: die Modellgeometrie besteht aus Fichte als Grundmaterial mit der Faserausrichtung (L) in x-Richtung und einer Normalspannungsanregung in z-Richtung (R) (Anordnung in Bild 14a). Die für die Simulation verwendeten Materialparameter für Fichte liefern die Gruppengeschwindigkeitsdiagramme in Bild 14b. Das zu erwartende Wellenfeld in der R-L-Ebene wird durch die 2D-EFIT-Simulation wiedergegeben und zeigt neben den Wellenfronten im Vollraum, die durch die Gruppengeschwindigkeitsdiagramme gut wiedergegeben werden, die in der Praxis auftretenden Oberflächen- und Kopfwellen (Bild 14d-f). Die Simulation zeigt die Entstehung einer schleifenförmigen Wellenfront, die ihren Ausgangspunkt zusammen mit den Rayleighwellen an der Oberfläche hat, sich dann aber von diesen trennt. Die nach rechts und links laufenden qSV-Wellen kreuzen sich - genau wie in dem Gruppengeschwindigkeitsdiagramm -, gehen dann aber nahtlos in die qP-Wellenfront über, die sich mit sehr hoher Geschwindigkeit in positive und negative x ($\sim L$)-Richtung ausbreitet. Mit geringer Amplitude ist die horizontale Verbindung der nach rechts und links laufenden qSV-Welle ('Schwalbenschwanz') zu erkennen. Erreicht die qSV-Welle den Streuer, so erfolgt eine Anregung von verschiedenen Wellentypen, wobei die reflektierte qSV-Welle dominant bleibt und vom Empfänger mit gleicher Polarisation wieder empfangen werden kann. Für die Abbildung von Fehlstellen ist es wichtig, dass die Reflexion an der Fehlstelle unter verschiedenen Einfallswinkeln beobachtet werden kann, dies ist hier möglich, denn - zumindest - bei der Zylinderbohrung werden die qSV-Wellen sogar von beiden Ästen zu dem Empfänger zurückgeworfen. Bei der entwickelten Rekonstruktionssoftware inter-saft lassen

sich die Äste der Geschwindigkeitsprofile auswählen und kombinieren. Die in Bild 14h dargestellte Geschwindigkeitsauswahl bewirkt eine sehr gute Fokussierung an der Oberkante des zylinderförmigen Streuers (Bild 14i), wohingegen die isotrope Rekonstruktion (Bild 14g) nur eine stark diffuse Anzeige des Streuers zeigt. Bild 14c zeigt das simulierte B-Bild für die scannende Impuls/Echo Anordnung. Deutlich sind die Effekte der Oberflächenwellen (kreuzförmige Strukturen) und die Reflexionen verschiedener Wellentypen an den Ecken des Testgebiets zu erkennen.

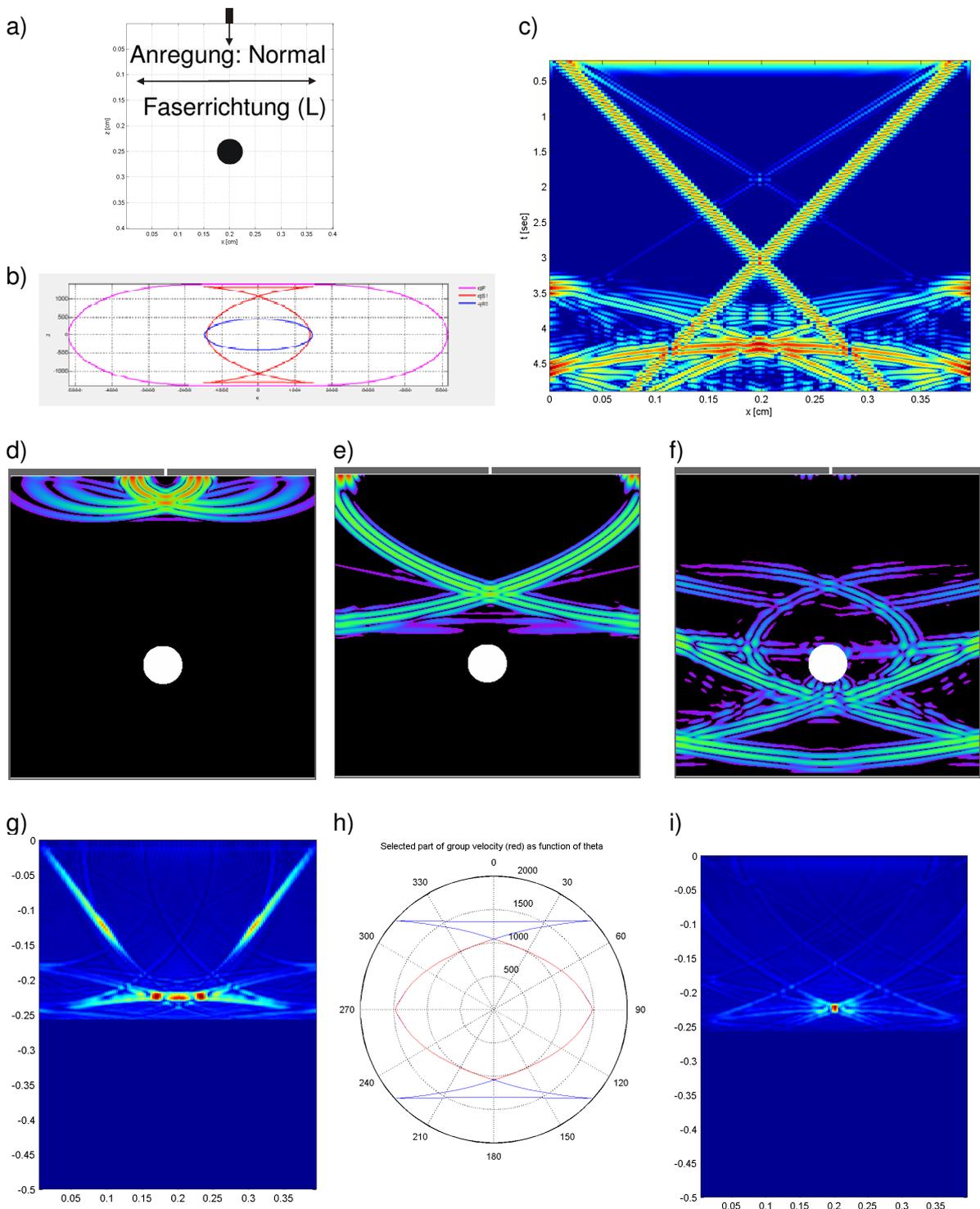


Bild 14 a) Skizze der Anordnung, b) Gruppengeschwindigkeiten in der R-L -Ebene, c) B-Bild der simulierten Impuls/Echo Messanordnung, d-f) Betrag des Geschwindigkeitsvektors zu verschiedenen Zeitpunkten, g) Isotrope Rekonstruktion, h) Ausgewählte Äste des Gruppengeschwindigkeitsdiagramms, i) Anisotrope Rekonstruktion mit der ausgewählten Geschwindigkeit

3.3.2 Dreidimensionale EFIT-Simulationen

Um ein vollständiges Verständnis der Wellenausbreitung in Holz zu bekommen, sind 3D-Simulationen notwendig. Die Erzeugung von Daten für Impuls/Echo Rekonstruktionsalgorithmen ist auf diese Art jedoch nicht möglich, da der Zeitaufwand zur Berechnung des Wellenfeldes bei einer Prüfkopfsendeposition mit den vorhandenen Rechenanlagen bereits in der Größenordnung von Tagen liegt, wobei der EFIT-Algorithmus bereits mit MPI (Message Passing Interface) parallelisiert ist und damit auf viele CPUs verteilt werden kann. Die vorliegenden Berechnungen wurden auf einem Rechner mit 16 Rechenkernen und 64 GB Hauptspeicher durchgeführt. Im Kapitel 4 werden die Simulationen der Wellenausbreitung in Fichte und Kiefer mit einer punktförmigen Quelle im Innern des Materials und mit punktförmigen Quellen auf der Oberfläche erläutert. Durch die Berechnung des Wellenfeldes der Quellen im Innern des Materials kann man Rückschlüsse auf das Streuverhalten von kleinen Streuzentren, die von einer Ultraschallwelle getroffen werden, ziehen. Die Polarisation spielt dabei eine ausschlaggebende Rolle. Es können hier nur exemplarische Rechnungen dargestellt werden. Die Berechnung des Wellenfeldes durch Quellen an der Oberfläche zeigt den Verlauf des vollständigen Wellenfeldes mit dem Einfluss von Oberflächenwellen und Kopfwellen.

3.4 Imaging mit Rekonstruktionsrechnung (Prinzip)

Die Rekonstruktionsrechnung von linear oder flächig aufgenommenen Ultraschalldaten ist ein seit 1986 in die Ultraschallmesstechnik eingeführtes Prinzip [34]. Es handelt sich dabei um die Berechnung der Position von Streuern innerhalb eines Volumens aus den Reflexionsmessungen mit S/E-Prüfköpfen an unterschiedlichen Positionen der Oberfläche. Die Ultraschallgeschwindigkeit im Material wird dabei als homogen und isotrop vorausgesetzt. Die Sender strahlen breitwinklig, so dass die Streuer von möglichst vielen Positionen aus beschallt werden. Über verschiedene Techniken der Rückausbreitung wird nach der **Synthetischen Aperture Focusing Technique (SAFT)** die Position der Streuer aus dem Streufeld rekonstruiert [34], [35]. Erfolgt bei der Berechnung eine Transformation in den Fourier-Raum, so spricht man von FT-SAFT. Weitere Ausführungen zu dieser Technik findet man in *Kapitel 5.1.3 Rekonstruktionsverfahren*.

Die beschriebenen Rekonstruktionstechniken werden seit ca. 1995 auch im Bauwesen für die zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen zunehmend angewendet [39], [41].

Um die Vorteile der SAFT-Rekonstruktion auch für akustisch anisotrope Werkstoffe wie z. B. austenitische Schweißstähle oder wie hier für Holz nutzen zu können, müssen die winkelabhängigen Geschwindigkeiten in Form von Slowness-Kurven bzw. Gruppengeschwindigkeitskurven berücksichtigt werden [38], [43], [44], [45]. Eine Implementierung von SAFT für die interaktive Verarbeitung von Ultraschalldaten von anisotropen Bauteilen insbesondere für Holz wurde an der Universität Kassel entwickelt [19], [37]. Die Validierung der Software erfolgte anhand von synthetischen Daten aus EFIT Simulationen [40]. Im laufenden Forschungsvorhaben werden diese Erkenntnisse für experimentell aufgenommene Datensätze angewendet und die Auswertungsmöglichkeiten für die Erfordernisse der Praxis erweitert und angepasst (siehe *Kapitel 5*).

4 Ergebnisse der EFIT-Modellierung an Kiefer und Fichte

4.1 Elastische Wellenausbreitung in Fichte

Wie in der Literatur erörtert, wird Fichtenholz durch eine orthotrope Kristallstruktur lokal angenähert. Die elastische Wellenausbreitung in Medien mit orthotroper Kristallstruktur ist wegen der 9 unabhängigen elastischen Steifigkeitskonstanten sehr kompliziert. Die hier verwendeten elastischen Parameter sind in Bild 15 zusammengestellt.

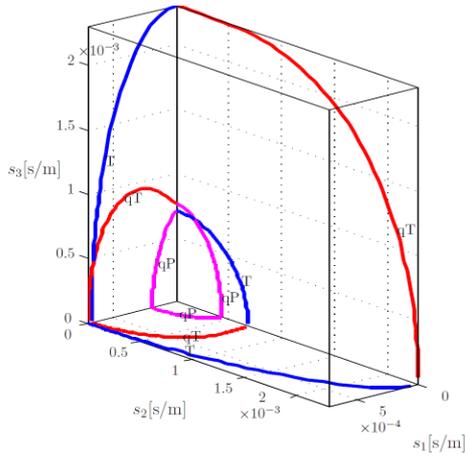
Zur Charakterisierung der Wellenmode unterscheidet man zwischen isotropen, schwach anisotropen und stark anisotropen Medien. Bei isotropen Medien können wir, sobald sich die Wellen voneinander getrennt haben (z. B. im Fernfeld), streng zwischen longitudinalen und transversalen Wellen unterscheiden. Verwendet man ausgedehnte Prüfköpfe, so entwickelt sich eine Vorzugsrichtung für das Schallfeld und man spricht von einer Einfallsebene, in der sich der Ultraschallstrahl in den Raum ausbreitet, bzw. in der der Ausbreitungsvektor einer ebenen Welle liegt. Je nach Polarisation des transversalen Wellenfeldes nennt man den Anteil der Welle mit Polarisation in der Einfallsebene die vertikal polarisierte (shear vertical ~ SV) Welle und den Anteil der Welle mit Polarisation senkrecht dazu die horizontal polarisierte (shear horizontal ~ SH) Welle. In schwach anisotropen Materialien, charakterisiert dadurch, dass sich die Materialparameter nur leicht von denen bei isotropen Materialien unterscheidet, kann man eine ähnliche, jedoch nicht mehr exakte Zuordnung der Ausbreitungsrichtung der Welle zu ihrer Polarisation finden, daher werden die Wellen dort als quasi-Druck (qP) und quasi-SH (qSH) bzw. quasi-SV (qSV) bezeichnet. Bei starker Anisotropie verliert sich der Zusammenhang zwischen Polarisations- und Ausbreitungsrichtung noch mehr, man kann sogar Raumrichtungen finden, bei denen die Druckwelle eine kleinere Geschwindigkeit als eine entsprechende Scherwelle besitzt. Insbesondere kann man der Transversalwelle im Raum nicht mehr eindeutig die Polarisation zur Einfallsebene zuordnen, weswegen man bei starker Anisotropie nur noch von qP, qS1 und qS2 spricht.

Bei orthotropen Materialien gibt es ausgezeichnete Kristallebenen, in denen die Transversalwelle eindeutig der Polarisation der Anregung folgt. Diese werden im Folgenden als qT und die Druckwelle als qP gekennzeichnet.

Aus der Lösung der elastodynamischen Grundgleichungen für ebene Wellen in homogenen anisotropen quellenfreien Medien ergeben sich die sogenannten Slownessdiagramme. Sie geben die Richtungsabhängigkeit der Inversen der Phasengeschwindigkeit für die jeweiligen Wellenmoden an. Die tatsächliche Ausprägung der jeweiligen Wellen wird dann durch die daraus abgeleitete Energiegeschwindigkeit wiedergegeben, die in verlustfreien Medien mit der Gruppengeschwindigkeit übereinstimmt [32]. Die Slowness-Kurve für die verschiedenen Kristallebenen für Fichte ist in Bild 15c-d dargestellt. Die blauen Kurven korrespondieren mit den 'reinen' Transversalwellen (T). Diese sind senkrecht zu der Ebene der jeweiligen Kurve polarisiert.

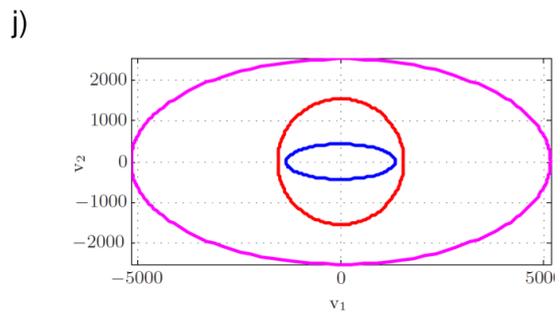
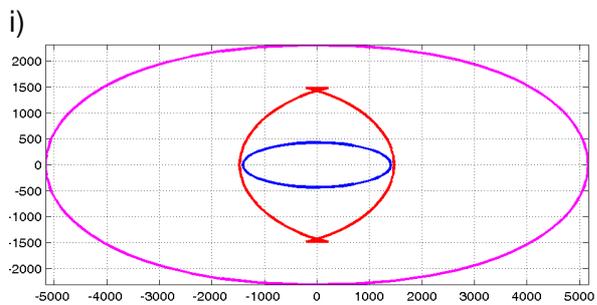
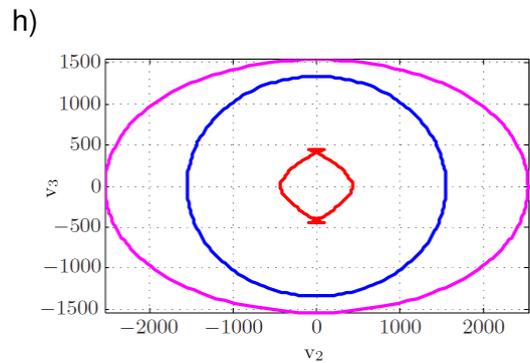
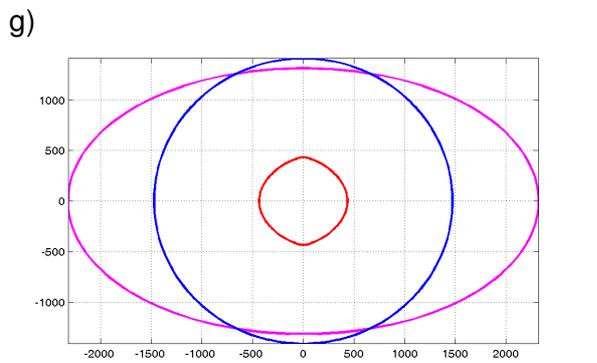
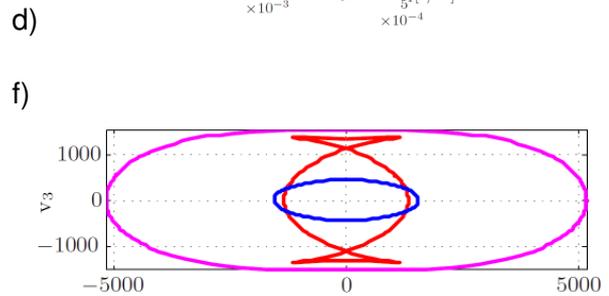
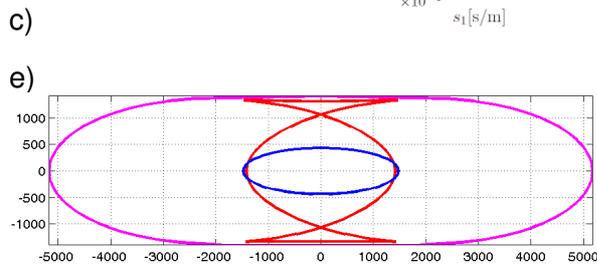
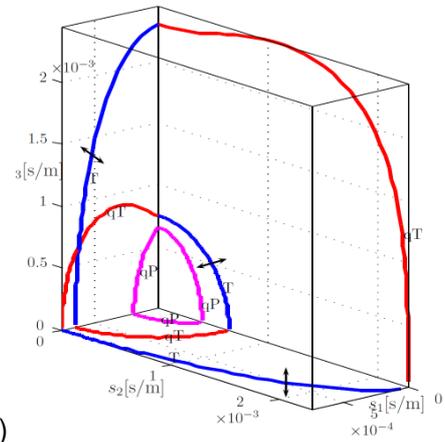
a)

$$[C] = \begin{bmatrix} 10.889 & 3.168 & 1.364 & 0 & 0 & 0 \\ 03.168 & 2.197 & 1.099 & 0 & 0 & 0 \\ 01.364 & 1.099 & 0.706 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.077 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.812 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.883 \end{bmatrix} \text{ GPa}$$



b)

$$[C] = \begin{bmatrix} 10.202 & 02.864 & 01.785 & 0 & 0 & 0 \\ 02.864 & 02.472 & 01.393 & 0 & 0 & 0 \\ 01.785 & 01.393 & 00.903 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.073 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.683 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.925 \end{bmatrix}$$



— qP — qT — T

Bild 15 Materialeigenschaften und Gruppengeschwindigkeitsdiagramme von Fichte (links aus [27]), $\rho = 408 \text{ kg/m}^3$ und Kiefer (rechts aus [27] 0.5MHz), $\rho = 383 \text{ kg/m}^3$

Für eine punktförmige Anregung im Zentrum des Simulationsvolumens in vertikaler Richtung ($x_3 \sim z \sim T$) mit dem Zeitverlauf eines 1MHz RC2-Impulses (anklingender Kosinusimpuls mit 2 Zyklen) wurde der Feldverlauf mit 3D-EFIT berechnet. In Bild 16 ist die räumliche Ausprägung des Wellenfeldes in Form von Wellenfronten für einen Zeitpunkt ($t = 5,82 \mu\text{s}$) in logarithmischer Darstellung in drei orthogonalen Schnittebenen und ihre Zuordnung im Volumen gezeigt.

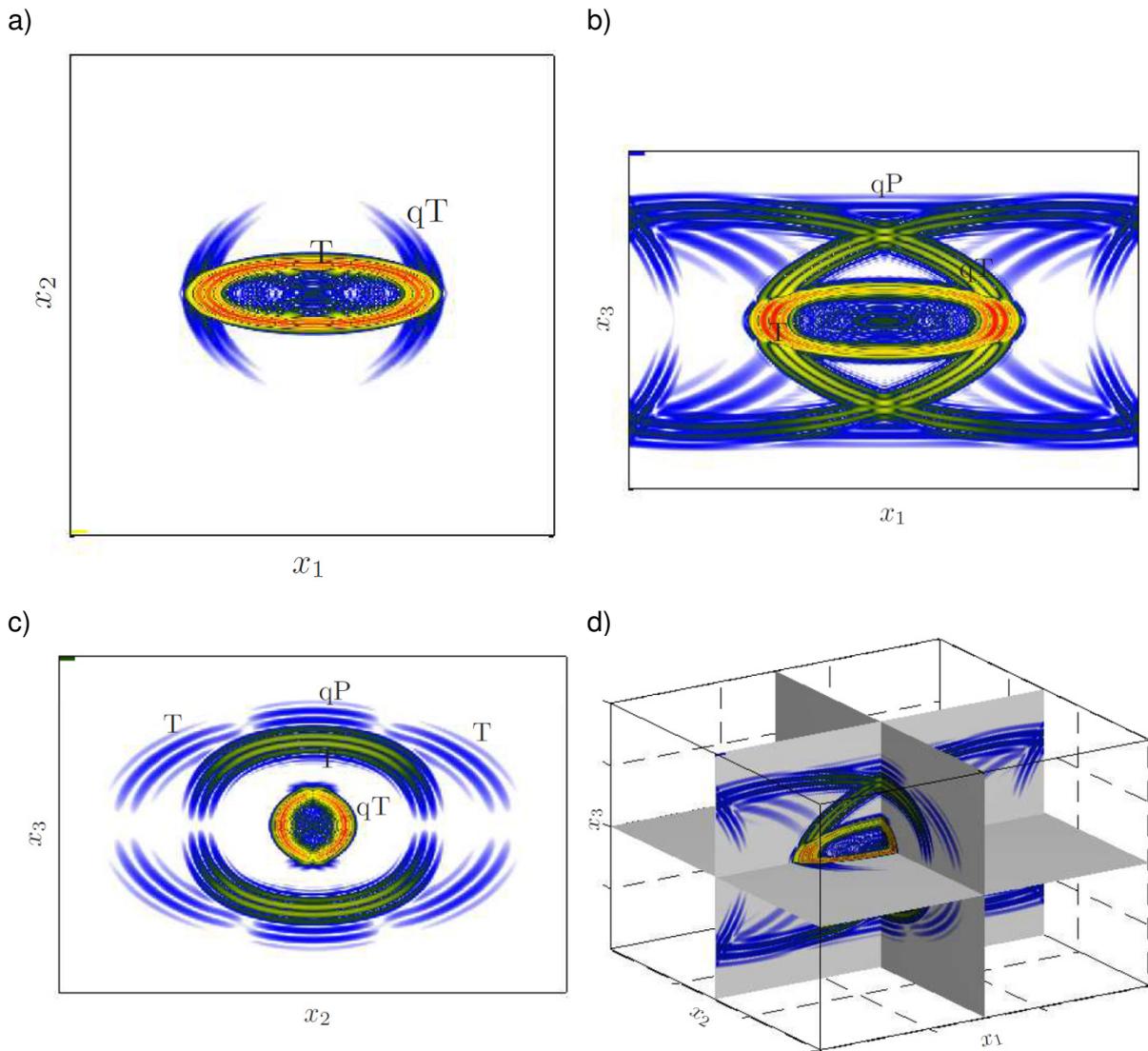


Bild 16 Momentaufnahme des Wellenfeldes bei punktförmiger Anregung in X_3 -Richtung, berechnet mit 3D-EFIT in orthotropem Fichtenholz zum Zeitpunkt $t=5.82\mu\text{s}$. a) Quasi transversale (qT) und transversale (T) Wellenmoden in der x_1x_2 -Ebene. b) Quasi longitudinale (qP), quasi transversale (qT) und transversale (T) Wellenmoden in der x_1x_3 -Ebene. c) qP, qT, und T-Wellenmoden in der x_2x_3 -Ebende. d) Darstellung in der räumlichen Anordnung

4.2 Elastische Wellenausbreitung in Kiefer

In Kiefernholz stehen die diagonalen Steifigkeitsparameter unter dem Zusammenhang $c_{11} > c_{22} > c_{66} > c_{33} > c_{55} > c_{44}$. Damit ist die Anordnung etwas anders als in Fichte, wo $c_{11} > c_{22} > c_{66} > c_{55} > c_{33} > c_{44}$ war. Die zugehörigen Slowness-Kurven sind in Bild 15d dargestellt. Die blauen Linien in den Kristallebenen gehören zu den 'reinen' Transversalwellen, die Polarisation ist jeweils senkrecht zu den Einfallsebenen. Die schnellen Wellen (in der Slowness-Kurve die inneren Kurven) sind die qP-Wellen (violett). Der verbleibende Wellenmode (rot) ist der quasi transversale Mode. Im Gegensatz zu dem Material Fichte schneiden sich die inneren Slowness-Kurven (qP) nicht mit anderen Moden, aber wir sehen

eine interessante Überschneidung zwischen den qT- und dem T-Mode. Zum Beispiel setzt sich der T-Mode der x_2x_3 -Ebene als qT-Mode in den Ebenen x_1x_2 und x_1x_3 fort.

Die dreidimensionale Wellenausbreitung in Kiefernholz ist in Bild 17 zusammengefasst. Die Simulation zeigt deutlich den Übergang der Wellenmoden in den Kristallebenen, obwohl nur der Betrag der Teilchengeschwindigkeit dargestellt ist. Eine vorzeichengetreue Darstellung wäre hier zu unanschaulich, da die Polarisierungen aus den dargestellten Ebenen herausragen können und eine falsche Vorstellung von Intensitäten vermitteln würden.

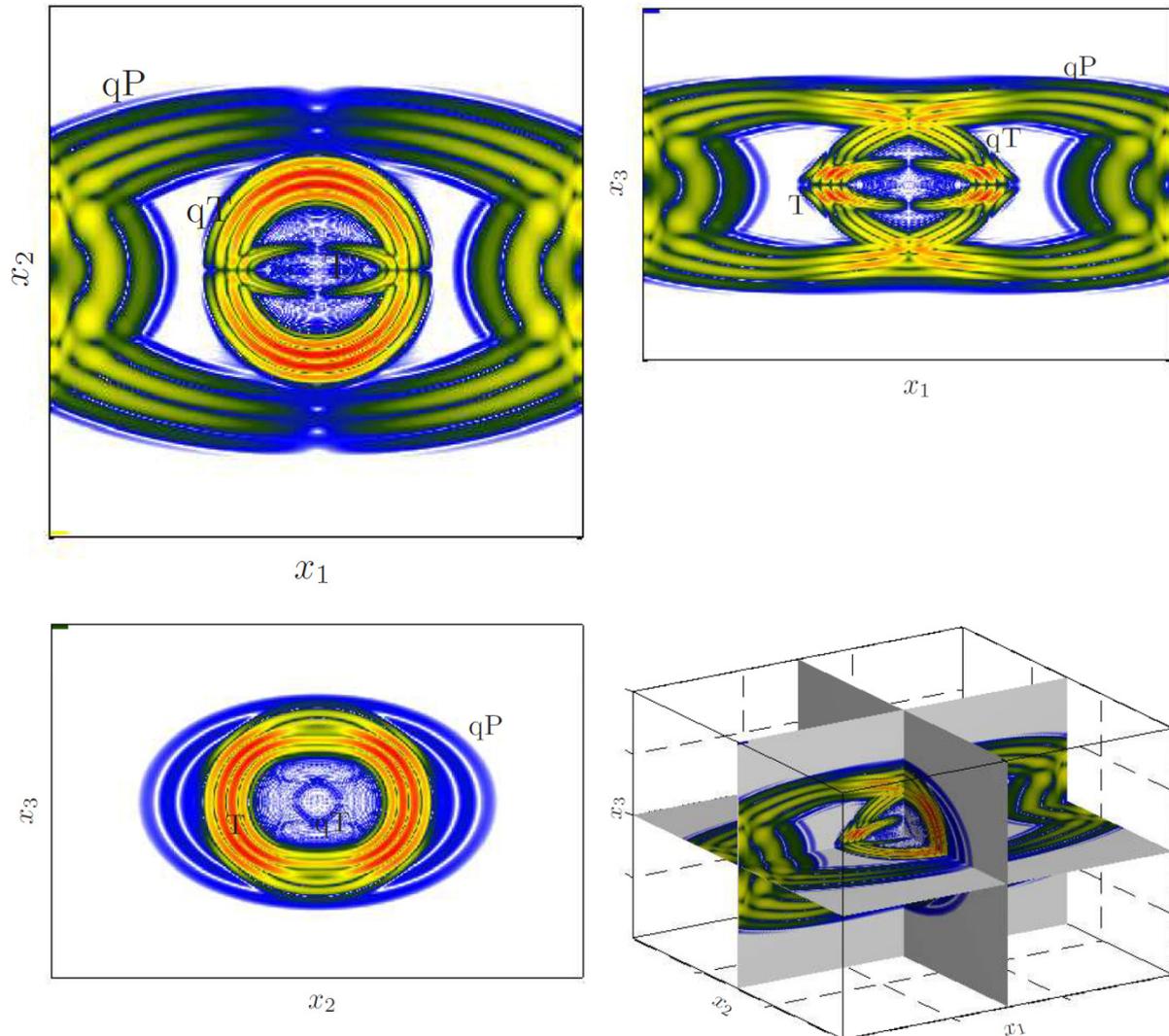


Bild 17 Momentaufnahme des Wellenfeldes einer 3D-EFIT-Simulation zum Zeitpunkt $t=4.36\mu s$. Material: Kiefer nach Bucur [25] (0.5MHz) Anregung: RC2 1MHz in X_1 -Richtung der v_1 -Geschwindigkeitskomponente

Da die Materialeigenschaften nach Bucur sich für Kiefer und Fichte nicht so stark unterscheiden, wurde bei der Kiefer-Simulation zusätzlich die Anregungsrichtung geändert. Die Anregung ist nun in x_1 -Richtung, d. h. in die Faserrichtung (L). Es sind nun deutlich andere Wellenfronten ausgeprägt, speziell die qP-Welle in Faserrichtung ist sehr dominant. Diese Anregung wurde auch schon in Bild 14 der 2D-EFIT-Simulation verwendet. Man kann schon erkennen, dass im Gegensatz zu der 2D-Simulation alle Scherkomponenten angeregt werden, wodurch sich das Wellenfeld noch deutlich verkompliziert. Eine wichtige Erkenntnis kann auch noch aus dem Vergleich der Gruppengeschwindigkeitsdiagramme mit den EFIT-Wellenfronten gewonnen werden: Vergleicht man die Wellenfeld-Simulation in Bild 16c (x_2x_3 -Ebene) mit dem Gruppengeschwindigkeitsdiagramm in Bild 15g, so fällt auf, dass das

intensive innere T-Wellenfeld der Simulation im Gruppengeschwindigkeitsdiagramm überhaupt nicht erscheint. Liegt hier ein Fehler vor? Nein, diese Wellenfront ist physikalisch in diesem Schnitt der Ebene vorhanden und ist der Kreuzungspunkt der 'Cusp' in Bild 15e, der bei der Berechnung der Gruppengeschwindigkeit wegen der Mehrdeutigkeit an dieser Stelle nicht erkannt und dargestellt wird. Für die Verwendung der Gruppengeschwindigkeit bei der 3D-SAFT-Rekonstruktion wird an dieser Stelle also ein Problem auftreten.

4.3 3D-EFIT-Simulation bei Oberflächenanregung mit Fehlstelle

Der Grad der Komplexität der anisotropen Wellenausbreitung erhöht sich noch, wenn Grenzflächen eine Rolle spielen. Die Anregung einer Ultraschallwelle erfolgt in der Regel durch aufgesetzte Prüfköpfe. Für die Simulation bedeutet dies: wir haben die Quelle auf den Rand des Simulationsgebiets zu setzen. Durch die physikalisch korrekte Anwendung einer spannungsfreien Randbedingung werden dann die Effekte wie Modenkonzersion und Oberflächenwellen richtig wiedergegeben. Um den Effekt eines Streukörpers auf das Wellenfeld kennenzulernen, bauen wir zusätzlich in das Simulationsgebiet einen quaderförmigen Hohlraum - von der Rückwand des Probekörpers ausgehend - ein.

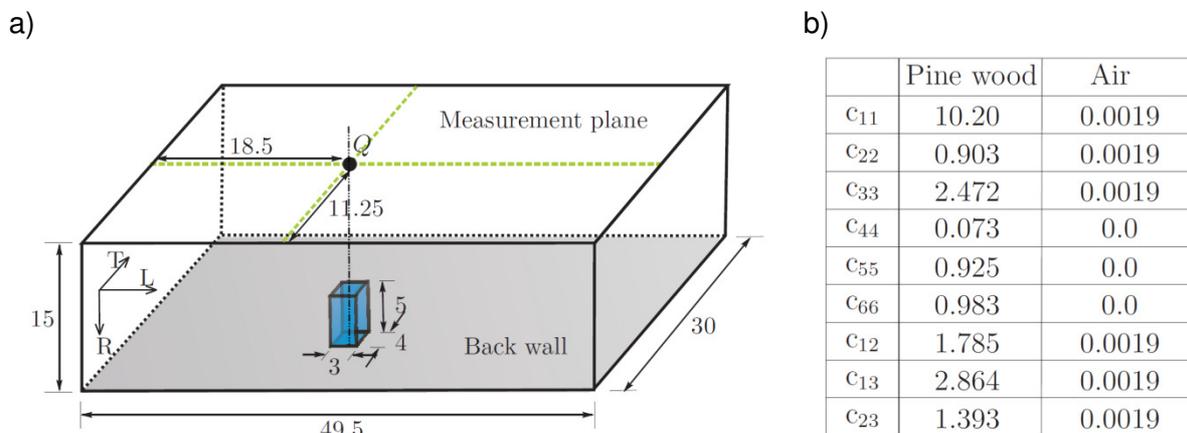


Bild 18 a) Skizze der Simulationsanordnung mit Fehlstelle und b) Materialeigenschaften

Bild 18a zeigt die gewählte Simulationsanordnung: die Ausdehnung des Testobjekts entspricht realistischen Ausmaßen, 49,5 cm * 30cm * 15cm. Die Fehlstelle - ein Quader von 3cm x 4cm x 5cm (LxBxH) - ist entsprechend der Ausdehnung einer Rückwandfräsung im Probekörper (Kiefer x1124) eingebracht. Gemäß der Anordnung des realen Probekörpers (R in die Tiefenrichtung, L als Anregungsrichtung) ist eine Transformation der Materialparameter für die Simulation (Bond Transformation) erforderlich, deren Ergebnis in Bild 18b aufgelistet ist. Die nach Bucur (0.5 MHz) angesetzten Daten (Bild 15b) sind um die L-Achse um 90° gedreht. Als Anregung der Geschwindigkeitskomponente in L-Richtung (v_1) dient ein bandbegrenzter RC2-Impuls mit einer Mittenfrequenz von 55 kHz - also ebenfalls gemäß einer realen Messung mit einem punktförmigen Einzelprüfkopf. Die Modellierung einer scannende Messung wird wegen des enormen Rechenaufwands nicht angestrebt. Jedoch wurde das Wellenfeld im kompletten Volumen zu einzelnen Zeitpunkten, in einzelnen orthogonalen Schnitten in einem vorgegebenen Zeitraster und als Messung entlang von Linien an der Oberfläche für alle Zeitpunkte zur Verwendung als A-Bilder bei der Simulation abgespeichert. Die Modellierung erfordert ca. 50 GB Arbeitsspeicher, entsprechend groß ist das Datenvolumen der Ergebnisse. Die Felddaten des Simulationsgebiets werden als Filme aufgearbeitet, von denen hier exemplarisch Momentaufnahmen dargestellt werden. Der Sendeprüfkopf ist direkt über dem Testfehler angeordnet. Die Ränder des Gebiets sind durch eine spannungsfreie Randbedingung begrenzt, was der Anordnung eines Probekörpers mit endlicher Ausdehnung am nächsten kommt. Durch die gewählten Randbedingungen treten Reflexionen, Oberflächenwellen, umlaufende Wellen und Modenumwandlung wie im realen

Bauteil auf. Um die Komplexität der Wellen ungestört zu erfassen, wurde zunächst die Simulationsanordnung ohne die Fehlstelle gerechnet. Die Ergebnisse einzelner Momentaufnahmen der Wellen an der Oberfläche sind in Bild 19 dargestellt. Zu den verschiedenen Zeitpunkten erkennt man, wie sich eine schnelle - fast gleichmäßig ausgeprägte Welle - in L-Richtung ausdehnt, gefolgt von einer langsamen, jedoch ebenfalls in L-Richtung schnelleren Welle, die sich bei der Betrachtung der Schnitte in den Raum als Rayleigh-Oberflächenwelle ausweitet. An deren Spitze (L-Richtung) trennt sich eine Scherwelle, die sich etwas schneller bewegt, langsam keilförmig ab. Die Wellen, die mit hoher Amplitude auf den Seitenflächen des Quaders zu sehen sind, sind in dieser Ansicht nicht erklärbar, sondern stellen sich bei der Betrachtung der Raumwellen als Ausläufer der Kopfwellen (in L-Richtung) bzw. als Auftreffen der im isotropen als SH-Welle bezeichneten Transversalwelle dar. Deutlich ist die Modenkonversion der qP-Welle in L-Richtung beim Auftreffen auf die Kanten bzw. auf die Seitenflächen erkennbar.

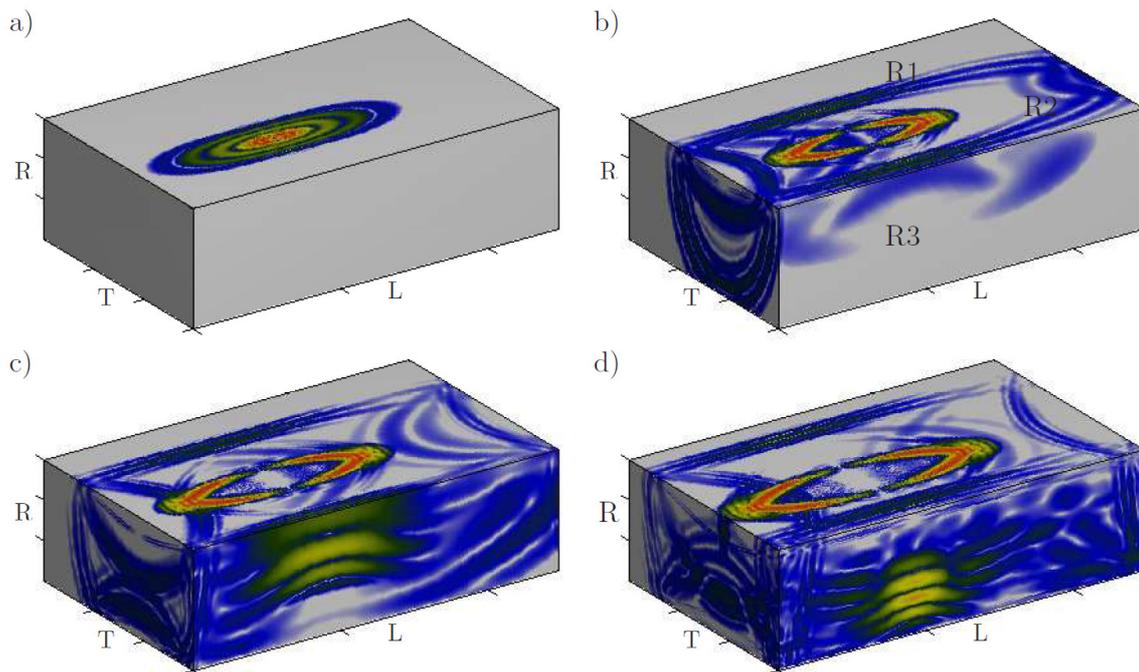


Bild 19 3D-EFIT-Simulation des Probekörpers aus Bild 18 - ohne Fehlstelle, als Referenz. Dargestellt ist der Betrag des Vektors der Teilchengeschwindigkeit an der Oberfläche für verschiedene Zeitpunkte

Bild 20 zeigt eine Momentaufnahme des Wellenfeldes der 3D-EFIT-Simulation im Raum mit rückseitiger quaderförmiger Fehlstelle kurz nach dem Zeitpunkt, wenn die Welle den luftgefüllten Quader getroffen hat. Die hier sichtbare, in die Luft austretende Welle wird angezeigt, ist aber nicht von Bedeutung, da ein Rückeinkoppeln der Luftwelle in den Körper wegen der Übergangsbedingungen Holz/Luft/Holz im Rahmen der Untersuchung vernachlässigbar ist. Die räumliche Anordnung der Schnitte ist im Bild rechts unten zu erkennen. D. h. die Schnitte in der L-R-Ebene und in der T-R-Ebene gehen mitten durch die Fehlstelle, wohingegen der T-L-Schnitt (Bild links oben) fast in der Rückwand angelegt ist. Es ist nur die qL-Welle zu sehen, da die quasi-Transversalwellen zu dem gewählten Zeitpunkt die Rückwand noch nicht erreicht haben. Sehr deutlich und auch sehr interessant ist die Anzeige der Kopfwellen in der R-L-Ebene (rechts oben), die sich aus der Transversalwelle bis hin zur Longitudinalwelle an der Oberfläche erstreckt. Die Reflexion an der Oberkante der quaderförmigen Fehlstelle hat die größte Amplitude für die Transversalwelle, da die reflektierte Longitudinalwelle in R-Richtung bei senkrechtem Einfall eine Nullstelle besitzt. Auch der Schnitt in der R-T-Ebene zeigt, dass die Fehlstelle voll von der Scherwelle getroffen wird und eine Scherwelle reflektiert wird.

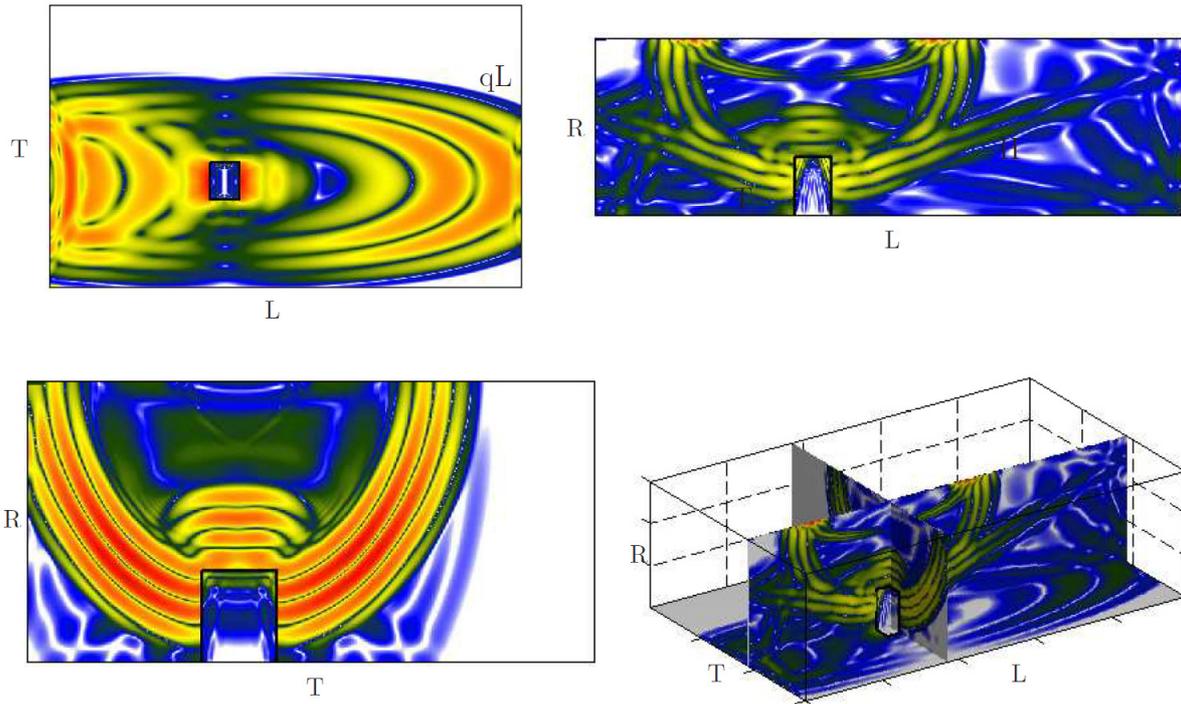


Bild 20 3D-EFIT-simuliertes Wellenfeld im Raum zum Zeitpunkt, wenn die Fehlstelle die T-Welle reflektiert

Um das Wellenfeld besser verfolgen zu können, ist ein Ausschnitt aus dem Wellenfeld-Film in Form von 6 Momentaufnahmen der R-L-Ebene in Bild 21 dargestellt. Es sind die schnelllaufende quasi longitudinale (qL) Welle und die beiden quasi-Transversalwellen zu erkennen, wobei die sehr langsame qT2-Welle, die die Fehlstelle noch nicht erreicht hat, in R-Richtung bei der gewählten Anregung in L-Richtung eine Nullstelle zeigt, sodass von dieser Welle keine Reflexionen zu erwarten sind. Deutlich ist die fast elliptische qL-Welle zu sehen, die ebenfalls fast eine Nullstelle in R-Richtung aufweist. Bedenkt man jedoch, dass für die Qualität einer Fehlstellenabbildung mit Abbildungsverfahren wie SAFT eine seitliche 'Sicht' auf den Streuvorgang notwendig ist, dann spielt diese qL-Welle in Verbindung mit der verbundenen Kopfwellen eine wichtige Rolle (siehe auch die Erläuterung der Experimente in Bild 57 bis Bild 59, S. 50).

Die Wellenausbreitung in der Schnittebene senkrecht dazu - die T-R-Ebene -, geschnitten durch den rückseitigen Streuer, zeigt die fast isotrope Ausprägung der Transversalwelle (Bild 22). Diese Eigenschaft bestätigt, dass es für die 3D-Rekonstruktion mit der Transversalwelle bei Anregung in L-Richtung in erster Näherung ausreichen wird, die T-R-Ebene als isotrop anzunehmen.

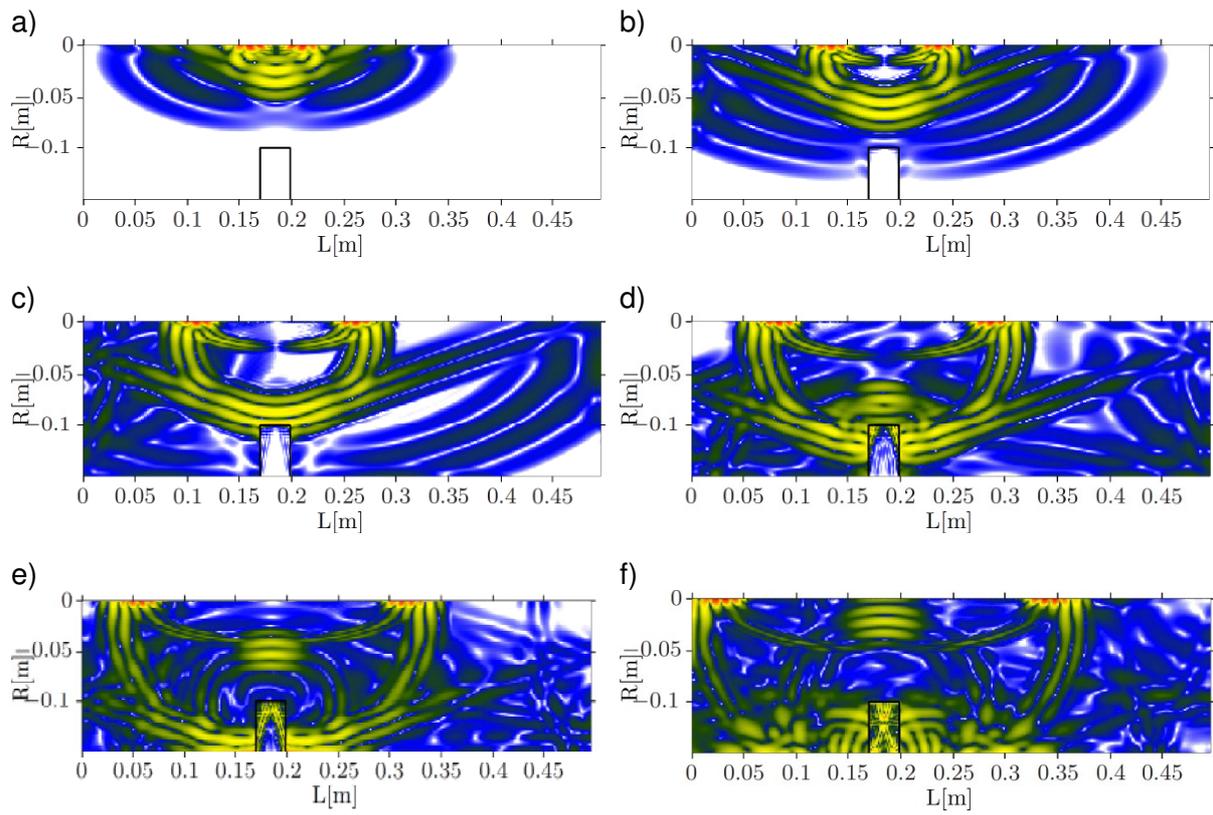


Bild 21 Darstellung des Wellenfeldes in der R-L-Ebene zu verschiedenen Zeitpunkten

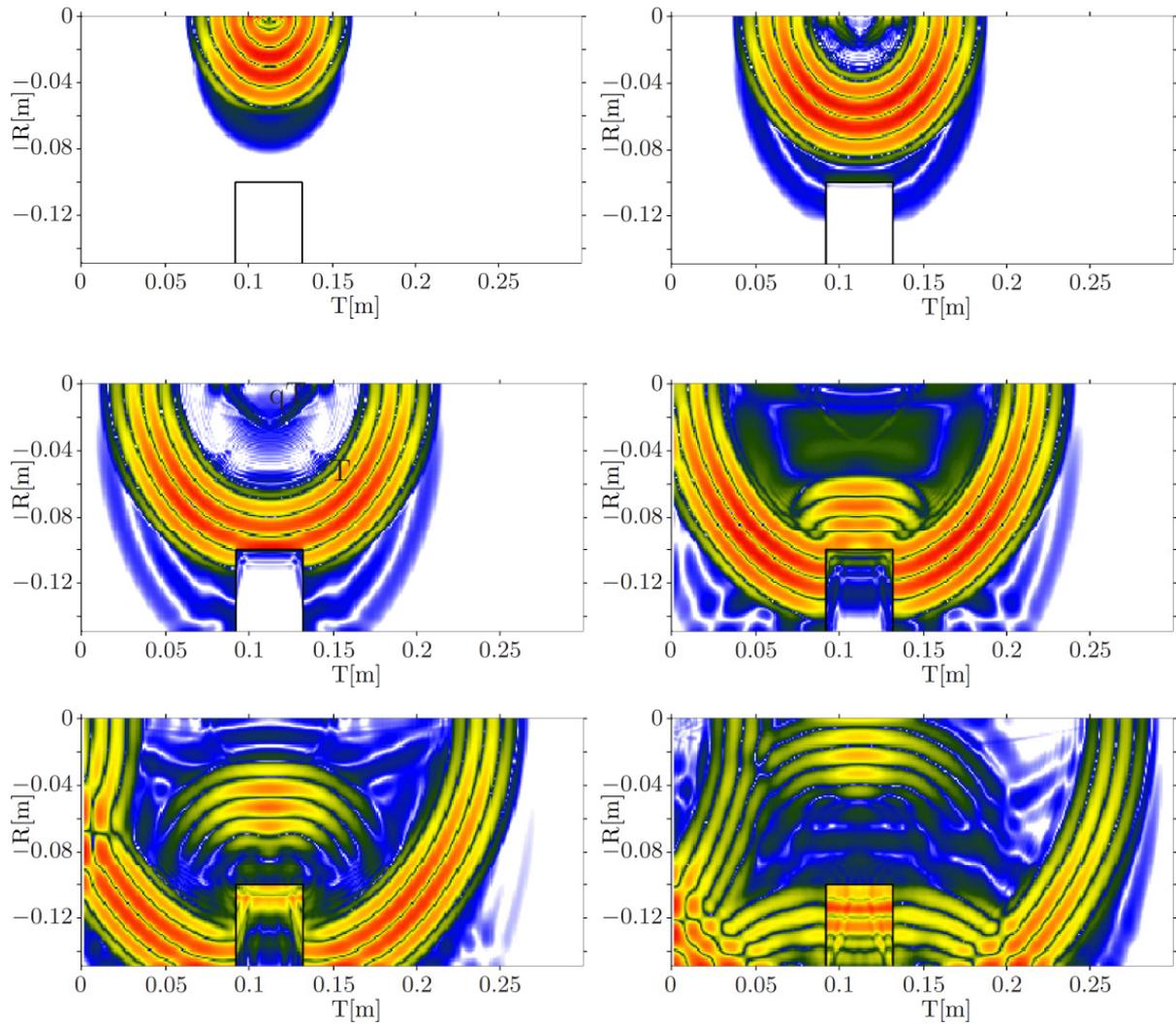


Bild 22 Darstellung des Wellenfeldes in der R-T-Ebene zu verschiedenen Zeitpunkten

5 Weiterentwicklung der Abbildungssoftware (Rekonstruktion) im Rahmen des Vorhabens

Basierend auf Softwareentwicklungen für die BAM in den letzten Jahren wurden aufgabenspezifische Erweiterungen im Rahmen des Projekts durchgeführt, die in den folgenden Abschnitten bei der Darstellung der Projektergebnisse ihre Anwendung finden. Die Arbeiten beziehen sich auf die drei wichtigen Segmente der Ultraschall-Datenverarbeitung:

Vorverarbeitung der Daten (Preprocessing)

Abbildungsalgorithmen zur bildgebenden Berechnung (Rekonstruktion)

Visualisierung der Daten bzw. der Rekonstruktionen

5.1.1 Visualisierung

Wichtig für die Visualisierung dreidimensionaler Daten in der praktischen Anwendung ist die schnelle interaktive Darstellungsweise von großen Datensätzen. Angepasst an die zu erwartende Datenmenge wurde das existierende interaktive Visualisierungstool 'browser' um Features erweitert, die das Auffinden und die Detaildarstellung von Anzeigen in den Daten erleichtern. Neben vielen Detailverbesserungen - wie Kontrast, Tiefenausgleich und Farbtabelle - wurden Fourier-Interpolationstechnik zur Detailauflösungsverbesserung und Projektionsmethoden zur integralen Volumenvisualisierung integriert (Bild 23), die es ermöglichen, interaktiv Datenbereiche mit Streuanzeigen aufzufinden und zu analysieren. Neben der kumulativen Stapelung von Datenscheiben in B- und C-Bilddarstellung, die die Maximalwerte einer Projektionslinie durch das Datenvolumen berechnet, gibt es Mittelungsprojektionen, die besonders die Geometrieeffekte hervorheben können, da gemeinsame Strukturen in den gestapelten Bildern hervorgehoben werden.

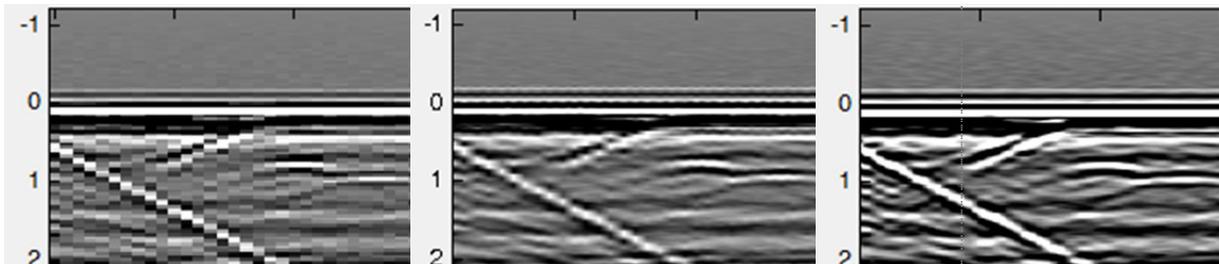


Bild 23 Detailvergrößerung eines B-Bildes mit unterschiedlichen Interpolationstechniken. Links: Original-Daten. Mitte: Grafische Interpolation (shading). Rechts: 8-fach Oversampling durch Fourier -Interpolation

5.1.2 Datenvorverarbeitung (Preprocessing)

Die Rekonstruktion von Daten an Objekten mit begrenzter Größe, wie es in der Analyse von Holzobjekten häufig vorkommt, ist besonders durch das Vorhandensein von Oberflächenwellen beeinflusst. Oberflächenwellen werden an Kanten und Objekten in der Oberfläche reflektiert und liefern Beiträge in den Daten, die vom Abbildungsalgorithmus nur dann richtig zugeordnet werden, wenn eine Rekonstruktion mit der passenden Geschwindigkeit durchgeführt wird. Durch das Vorhandensein von verschiedenen Wellentypen, die mit verschiedenen Geschwindigkeiten unterwegs sind, gibt es nicht 'die' Geschwindigkeit, die für alle Wellenarten korrekt wäre, was dann zu Falschanzeigen (Artefakte) in der Rekonstruktion führt. Daher ist es erforderlich, Wellen, die durch eine gewählte Geschwindigkeit für eine Rekonstruktion einer Raumwelle nicht korrekt vertreten sind, aus den Daten zu entfernen. Übliche Time-Gating Verfahren - d. h., Abtrennen und Ausblenden von Datenbereichen - sind bei den gegebenen kleinen Ausmaßen der Objekte nicht einsetzbar, daher wurde ein Verfahren entwickelt, das durch Vorgabe von

Bauteilgeometrien die wahrscheinlich entstehenden Oberflächenwellen schätzt und durch adaptive Mittelwertbildung mittels Fourier-Techniken diese aus den Daten heraus rechnet (Bild 24, Bild 25). Eine manuelle Korrektur der Geschwindigkeiten, die z. B. bei Brettschichtholz zwischen benachbarten Brettern auftreten kann, ist interaktiv möglich und auch erforderlich.

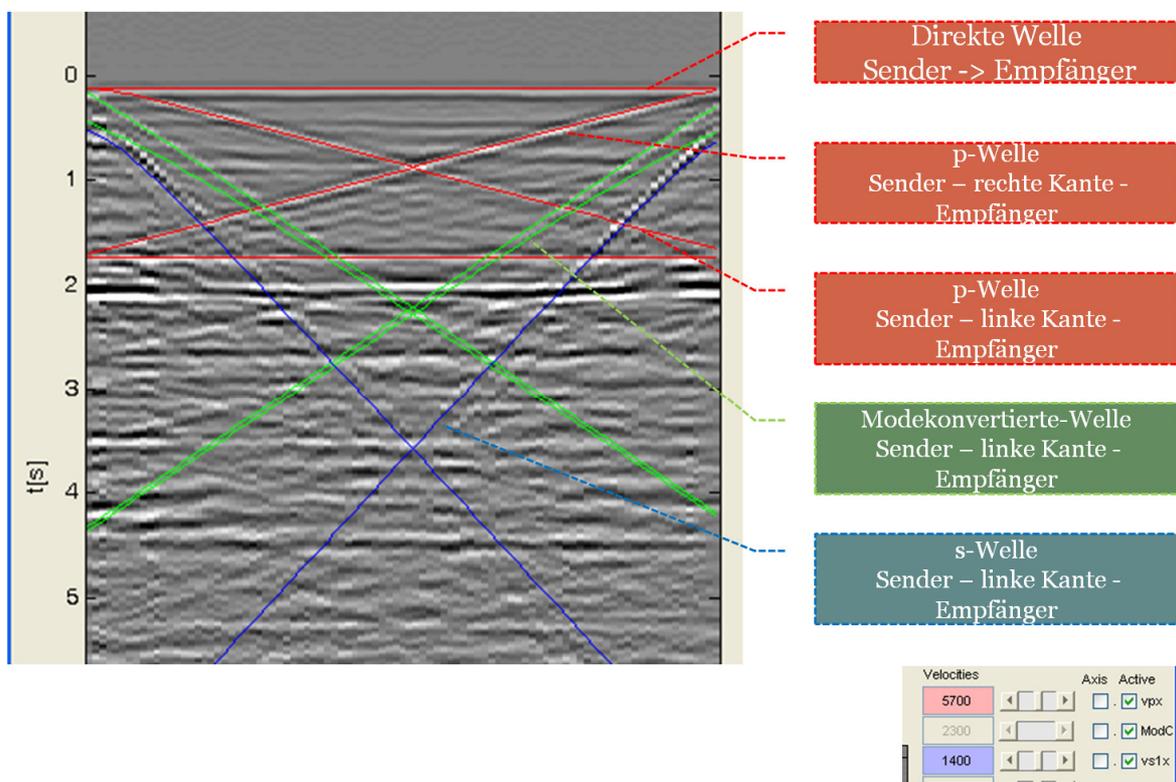


Bild 24 Beispiel zur Detektion von Oberflächenwellen: Durch Vorgabe der Messanordnung, Geometrie des Objekts und der Geschwindigkeiten wird die Lage der vermuteten Oberflächenwellen ermittelt

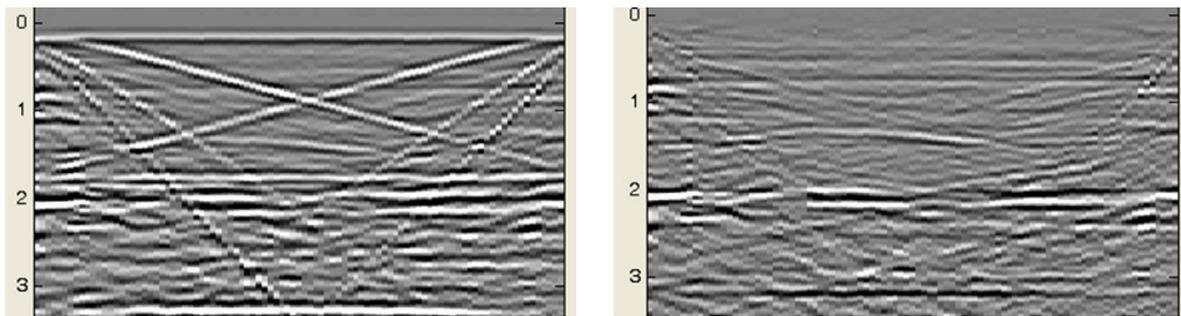


Bild 25 Unterdrückung von Oberflächenwellen: Links: Original-Datensatz, rechts: Oberflächenwellen unterdrückt, wodurch Anzeigen aus der Tiefe des Bauteils deutlicher hervortreten (Messung HolzPK_parL_75kHz_5mm_1sender1empf_0)

Der Ansatz berücksichtigt Modenumwandlung und Anisotropie näherungsweise, wobei die Gruppengeschwindigkeitsprofile der Raumwellen in der Ebene der Messfläche angenommen werden. Die Unterdrückung von Rayleigh-Wellen erfordert die manuelle Eingabe der Geschwindigkeit. Dispersion wird nicht berücksichtigt.

Ein alternatives Verfahren wurde entwickelt, um Geometrieanzeigen von Oberflächenwellen zu unterdrücken, das von der Annahme ausgeht, dass sich Oberflächenwellenreflexionen als

schräge Muster im B-Bild einer Messung darstellen. Diese schrägen Muster können durch Herausschneiden der entsprechenden Linien oder Zonen aus dem 2D-Spektrum des Bildes pauschal entfernt werden (Bild 26). Da diese Methode keine Rücksicht auf die Ursache einer solchen schrägen Linie nimmt, können auch Ortskurventeile eliminiert werden, die ihre Ursache in Streuungen aus der Tiefe des Objekts haben. Dennoch kann die Anwendung des Verfahrens nützlich sein, um der Menge der ungewollten Wellentypen Herr zu werden.

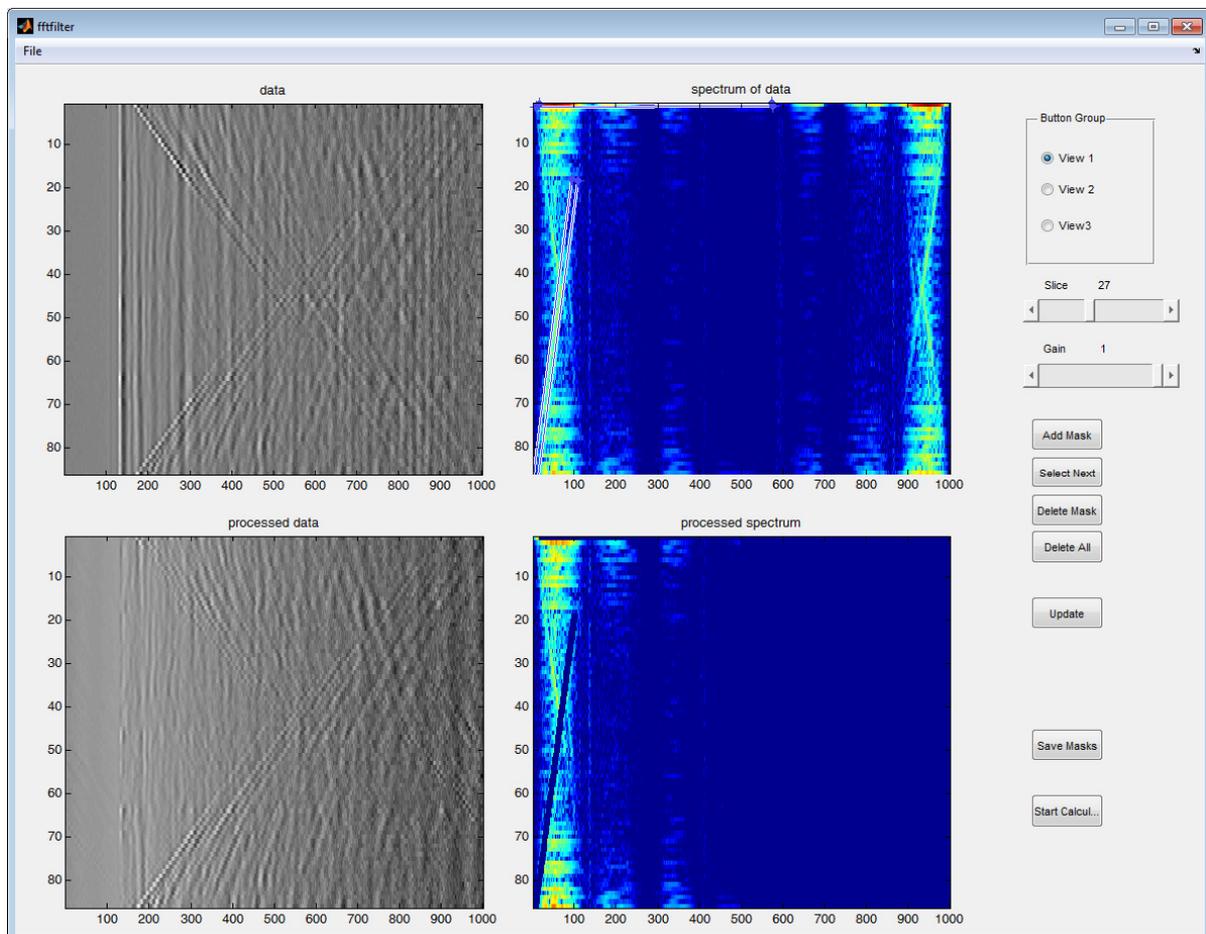


Bild 26 Unterdrückung von geradlinigen Anzeigen aus dem Datenfeld durch spektrale Maskierung. Oben links: Original-Datensatz bei $f = 75$ kHz, oben rechts: 2D-Spektrum des Datensatzes mit eingezeichneten Masken (manuell erstellt), es sind nur die Schräglage einer Oberflächenreflexion und oberflächenparallele Anzeigen berücksichtigt. Links unten: Datensatz als Ergebnis der Maskierung: die Oberflächenwellenreflexionen an einem Rand und Schichtanzeigen oder Mehrfachreflexionen sind unterdrückt. (Vertikale Achse: Messkoordinate als Abtastwerte, horizontale Achse: Zeitkoordinate bzw. Frequenzspektrum als Abtastwerte) (Messung: HolzPK_parL_75kHz_5mm_1sender1empf_0)

5.1.3 Rekonstruktionsverfahren

Die Berechnung der Rekonstruktionen erfolgt nach dem SAFT-Prinzip (Synthetic Aperture Focusing Technique) [33], [34]. Abgeleitet aus mathematischen Formulierungen von inversen Beugungsproblemen [35] zeigt es sich, dass das recht anschauliche SAFT - Prinzip (laufzeitgerechte Überlagerung von Signalen aus verschiedenen Sende/Empfangspositionen) unter Näherungen wie ein Wellenausbreitungsalgorithmus nach dem Huygensschen Prinzip (Überlagerung von Elementarwellen) funktioniert und daher auch unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Näherungen als Rekonstruktionsalgorithmus für inhomogene isotrope und inhomogene anisotrope Medien verwendet werden kann [37]. Voraussetzung von Rekonstruktionen nach dem SAFT-Prinzip ist die Kenntnis der Ausbreitungseigenschaften des Mediums, mindestens bis zu der zu detektierenden Störstelle. Diese Vorinformation ist bei dem Medium Holz nur näherungsweise und

exemplarisch bekannt, da Holz extreme Anisotropie aufweist und die Orientierung der Vorzugsrichtungen sich innerhalb einer Materialprobe extrem verändern kann. SAFT als Lösung des inversen Streuproblems kann im Ortsbereich oder unter weiteren Randbedingungen sehr effektiv im Fourier-Bereich (FT-SAFT) ausgewertet werden [36]. Bei anisotropen Materialien spielen dabei für die Rekonstruktion die Gruppengeschwindigkeiten (SAFT) und die Phasengeschwindigkeiten (FT-SAFT) die ausschlaggebende Rolle. Für homogen anisotrope Materialien (orthotrop und transversal isotrop) kann man diese bei bekannten Materialparametern analytisch berechnen.

Im Rahmen des Projekts wurde die Software 'inter-saft' an vielen Stellen an die spezifischen Erfordernisse angepasst. Besonderer Wert wurde dabei auf die interaktive Einflussnahme auf alle Rekonstruktionsparameter gelegt. Da speziell für Holz die Annahmen über den Werkstoff niemals exakt bestimmbar und in Materialtabellen ablegbar sind, besteht der hier gewählte Ansatz darin, die Parameter interaktiv zu ändern und die Ergebnisse bis zu einem subjektiven Optimum zu verbessern. Insbesondere die Winkelbereiche der Gruppengeschwindigkeiten und die Auswahl der Geschwindigkeitsäste spielen dabei eine große Rolle. Hierzu wurde ein heuristischer Geschwindigkeitsansatz entwickelt, mit dessen Hilfe durch die Veränderung von nur einer Größe pro anisotrope Symmetrieebene das Rekonstruktionsergebnis optimiert werden kann (Bild 27).

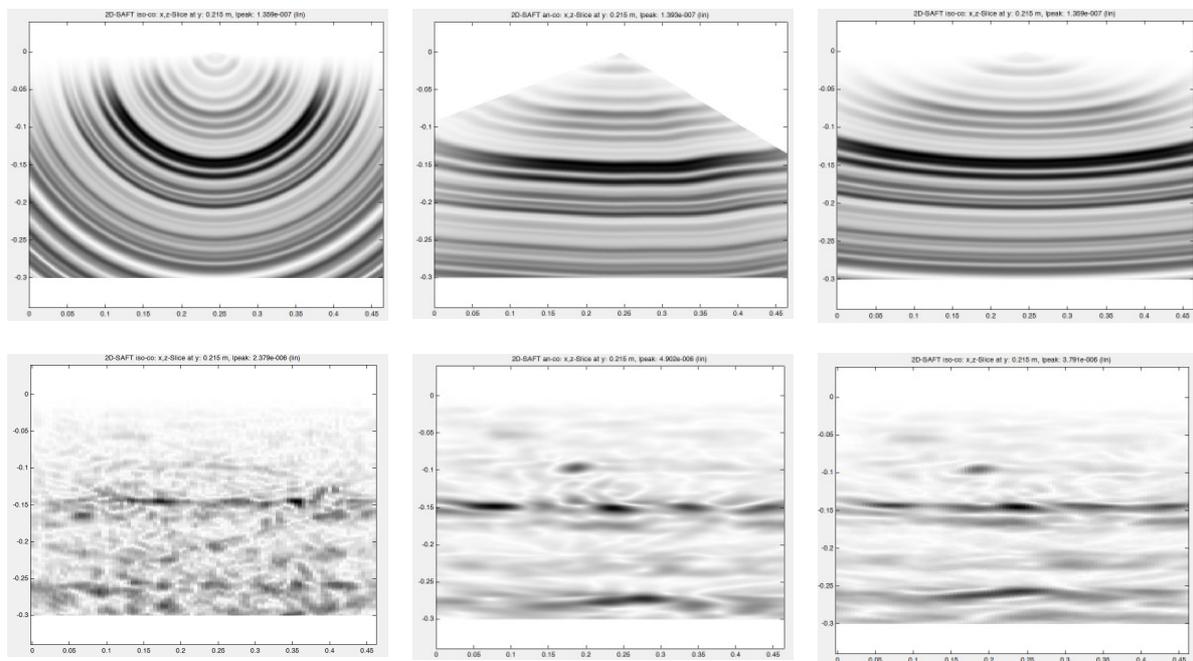


Bild 27 Rekonstruktionsergebnisse an einer Holzprobe mit verschiedenen Geschwindigkeitsprofilen. Oben: Rekonstruktion eines einzelnen A-Bildes. Unten: Rekonstruktion einer Messlinie. Links: Isotropes Geschwindigkeitsmodell, Mitte: Manuelles Geschwindigkeitsmodell, gewonnen aus einer Anzeige im B-Bild. Rechts: Parametrisiertes Geschwindigkeitsmodell, gewonnen durch interaktive Optimierung. Nur bei der sehr aufwändigen manuellen Geschwindigkeitsanalyse und bei dem parametrischen Ansatz ist eine Streuanzeige in der richtigen Tiefe zu erkennen. (Messung: HolzPK_parL_75kHz_5mm_1sender1empf_0)

Die Auswahl der Materialparameter erfolgt aus einer Materialbibliothek, die sich interaktiv erweitern lässt. Hierbei wird ein mehrstufiges Konzept verfolgt, das es erlaubt, mehrere Materialien mit jeweils unterschiedlicher Orientierung einfach zu selektieren (Bild 28).

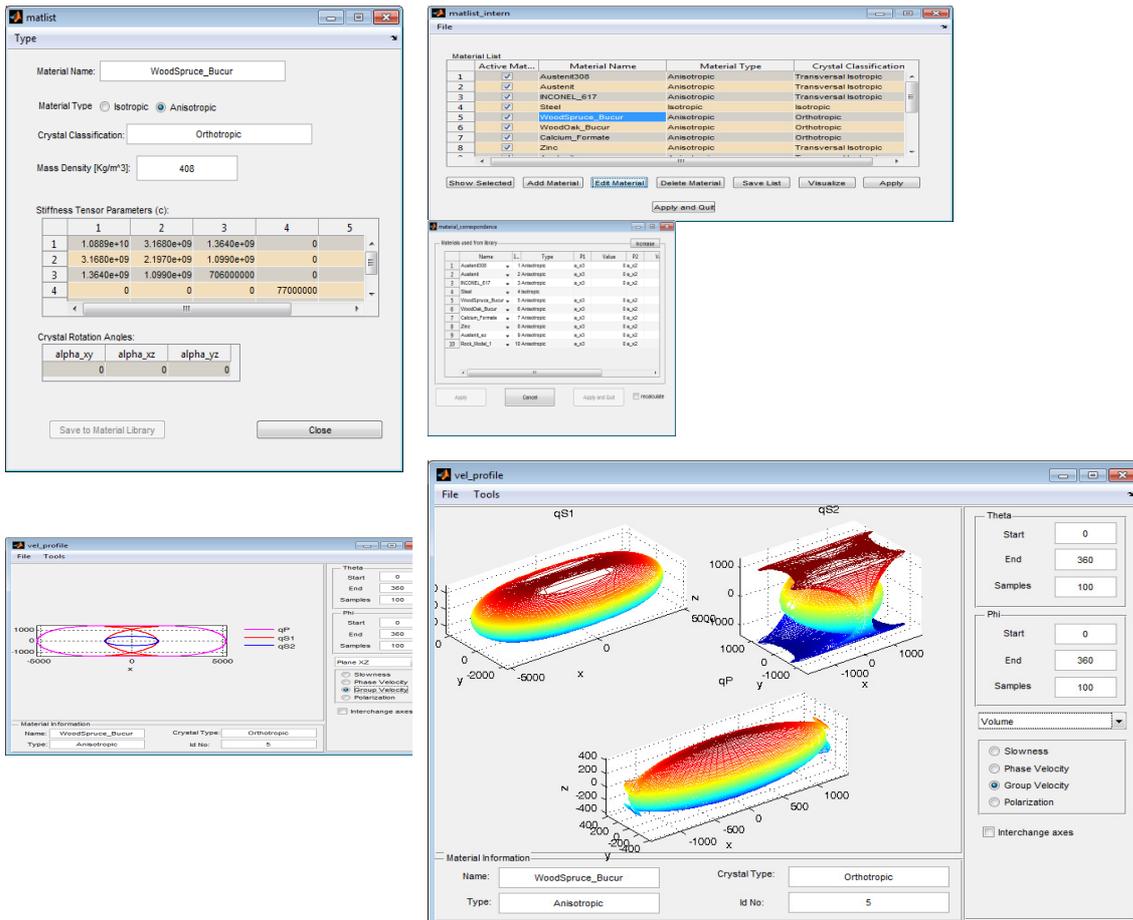


Bild 28 Arbeiten mit der Materialtabelle: Links oben: Definition der Materialeigenschaften, links unten: 2D-Visualisierung der Geschwindigkeiten. Rechts oben: Materialtabelle und Materialkorrespondenztable. Rechts unten: 3D-Visualisierung der Geschwindigkeiten

Die korrekte mathematische Umsetzung der SAFT-Analyse von anisotropen Materialien wird durch eine Erweiterung des Fourier-SAFT-Algorithmus erreicht. Unter der Annahme eines homogen anisotropen Materials liefert der anisotrope FT-SAFT-Algorithmus [38] eine vollständige Berücksichtigung aller Details einer anisotropen Wellenfront (bei einem Wellentyp), da Phasengeschwindigkeitsdiagramme keine Mehrdeutigkeit aufweisen, wie sie bei den Gruppengeschwindigkeitsdiagrammen auftreten können (Cusps). Dennoch wird in solchen Fällen die Mehrdeutigkeit der Gruppengeschwindigkeit durch die Transformation vom Fourier-Bereich in den Ortsbereich vollständig wiedergegeben. Bild 29 zeigt die anisotrope 3D-FT-SAFT-Rekonstruktion eines Einzelimpulses von einem einzelnen A-Bild (Impulsantwort des Abbildungsalgorithmus), die als Grundbaustein des SAFT-Algorithmus dient (Huygenssche Elementarwelle) und sich im isotropen Fall als amplitudengewichteter Halbkreis manifestiert.

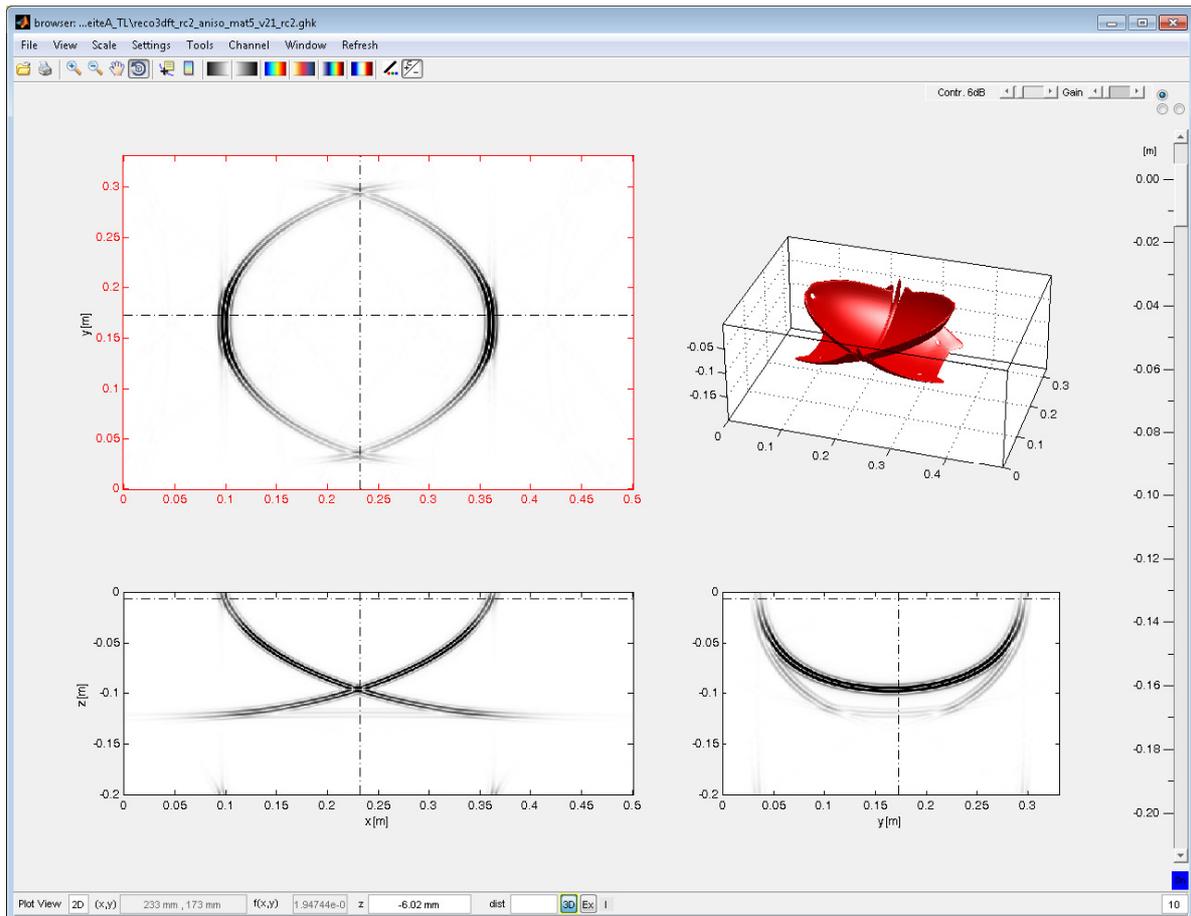


Bild 29 Die 3D-anisotrope FT-SAFT-Rekonstruktion eines Einzelimpulses in einem A-Bild zeigt die räumliche Verteilung einer anisotropen Wellenfront eines Wellenmodes. Es sind Schnittbilder (links und unten) und ein Isokonturbild (rechts oben) dargestellt. Die Positionen der jeweiligen Schnittebenen sind als gestrichelte Linien markiert.

5.1.4 Rekonstruktion von Linear Array-Daten

Im Rahmen des Projekts wurde auch die Auswertung von Messdaten, aufgenommen mit einem Linear Array (z. B. Acscys Mira), optimiert. Der Algorithmus basiert auf dem multistatischen SAFT-Algorithmus mit besonderen Anforderungen. D. h., anstelle der monostatischen Anordnung (Sender und Empfänger befinden sich an der gleichen Position) bzw. der bistatischen Anordnung (Sender und Empfänger bewegen sich im festen Abstand zueinander über die Messfläche) wird die Struktur des Linear Arrays verwendet. D. h. die Sendepositionen variieren innerhalb des Arrays von Prüfköpfen, die entlang einer Linie angeordnet sind, und als Empfänger dienen jeweils die übrigen Transducer im Array (die Reziprozität wird ausgenutzt, sodass jeder Schallweg nur einfach verwendet wird). Der aus der Radartechnik stammende Begriff 'bistatisch' wird hier besser durch den Begriff 'Common Offset', wie er in der Seismik verwendet wird, ersetzt, da Sender und Empfänger nicht ortsfest sind.

Unter der Voraussetzung, dass das komplette Array in einem kartesischen Raster über die Messfläche geführt wird, wobei die Linie zwischen Sendern und Empfängern parallel geführt werden muss, wurde der Algorithmus auf drei Dimensionen erweitert. D. h., es wird eine Rekonstruktion aus allen Daten in ein 3D-Raumgebiet gerechnet. Hierbei sollte sichergestellt sein, dass die Einflüsse von einzelnen Messpositionen bis hin zu einzelnen Transducerpositionen interaktiv untersucht werden können. Über die Benutzeroberfläche der Software kann man Array-Positionen selektieren sowie Ultraschallsignalwege innerhalb des Arrays schalten bzw. stufenlos ausblenden (Bild 30, Bild 31). Außerdem ist vorgesehen, monostatische und common offset-Anordnungen mit Messdaten vom Linear Array zu

simulieren, um den Einfluss verschiedener Messanordnungen auf das Rekonstruktionsergebnis zu untersuchen.

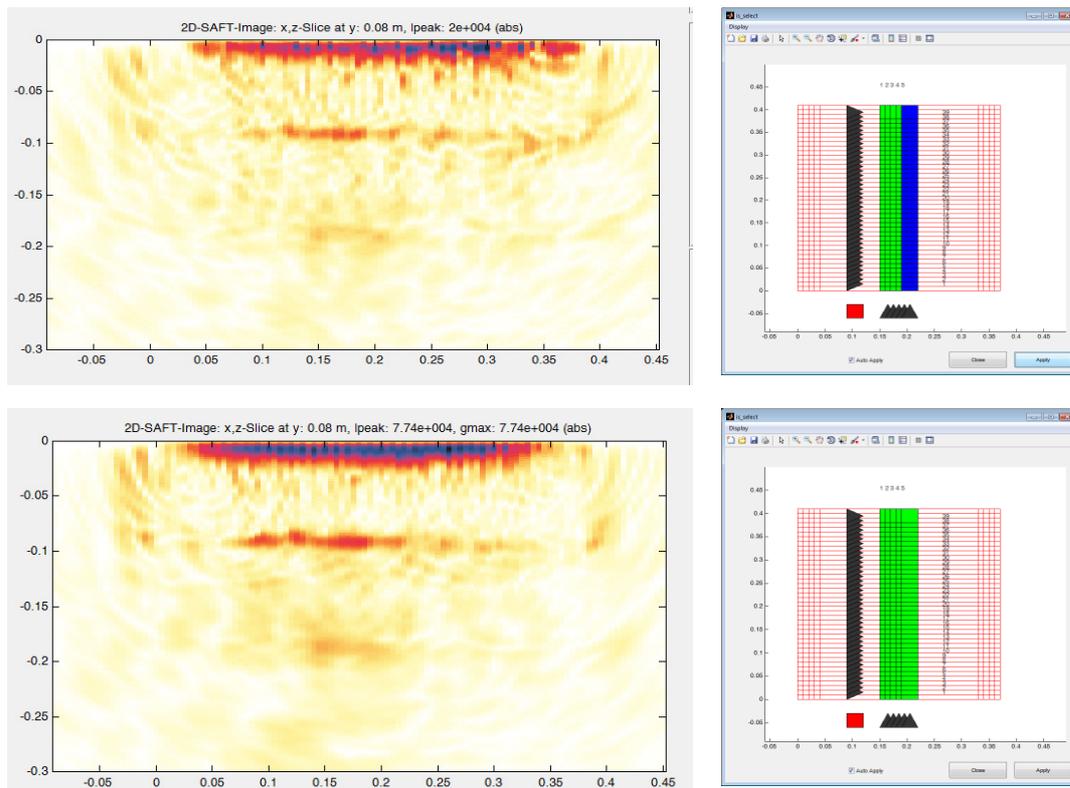


Bild 30 Auswahl von Array-Positionen, die zur Rekonstruktion beitragen: Oben: 1 Messband wird rekonstruiert, unten: 5 Messbänder werden rekonstruiert. Rechts: interaktive Selektion von Array-Positionen. Die rot umrandeten Felder zeigen die Ausdehnung des Arrays. Die Messungen wurden überlappend im Abstand von 1cm durchgeführt (Messung: Mira-F245-75KHZ_Bohrungen_9-fach)

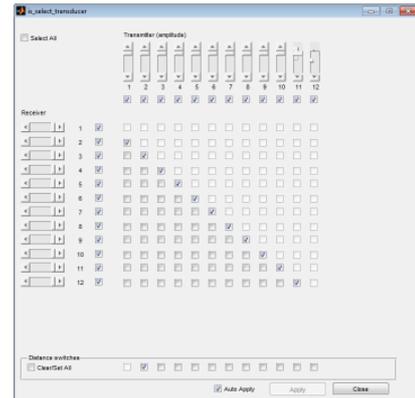
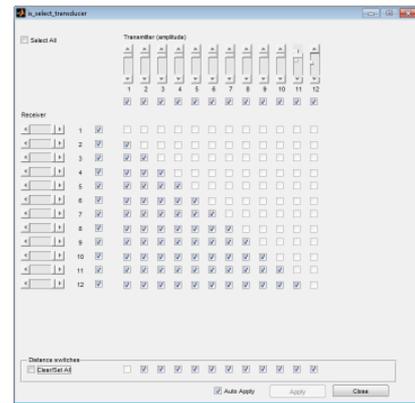
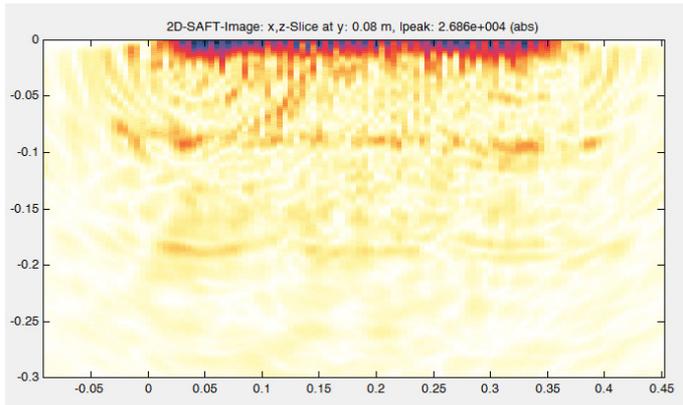
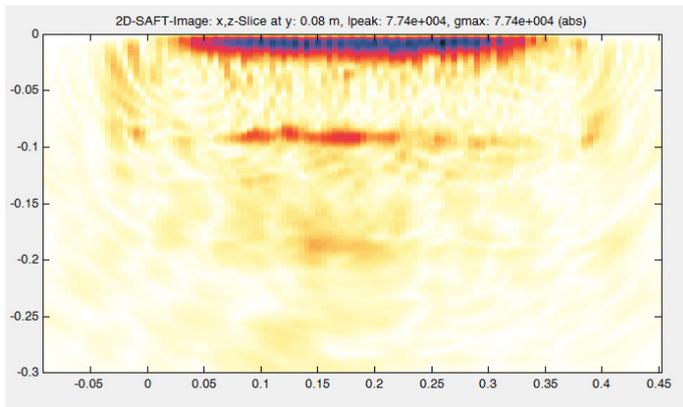


Bild 31 Auswahl von Sender- und Empfängeranordnungen: Oben: komplettes Array, unten: common offset-Anordnung - hier im Abstand von zwei benachbarten Array-Elementen (3cm). Rechts: Darstellung der Auswahl über Schalter und Amplitudenregler (Messung: Mira-F245-75KHZ_Bohrungen_9-fach)

6 Ergebnisse an Probekörpern

6.1 Übersicht Probekörper

Kiefernholz-Probekörper [K219.1 - .8, x1124]

Die für das Vorhaben zuerst hergestellten Probekörper sind aus Kiefernholz. Die Untersuchungen dazu sind in Kapitel 6.3 beschrieben.

Im ersten Teil des Vorhabens werden Probekörper verwendet, die eine möglichst homogene anisotrope Struktur aufweisen. Das bedeutet, dass die für das Holz charakteristischen Symmetrierichtungen (L: Longitudinal, R: Radial, T: Tangential) möglichst wenig Krümmung aufweisen, also anders als bei einem gewachsenen Baum (Vollholz).



Bild 32 Kiefernholz-Probekörper (Kiefer_Pk1)

Um das zu realisieren wurden in der BAM Probekörper aus Kiefernholz hergestellt. Dafür wurden quaderförmige Holzstücke der Abmaße 5 cm x 2,5 cm x 50 cm verleimt, bei denen die Jahresringe möglichst parallel verlaufen. Die Maße der Einzelteile orientieren sich an Probekörpern, wie sie von der

Fachgruppe 4.1 der BAM *Biologie im Umwelt- und Materialschutz* zur Verfügung gestellt wurden. Bild 32 zeigt den ersten Kiefernholz-Probekörper (Kiefer_Pk1). Dieser ist 50 cm x 50 cm x 7 cm groß. Der Bau der Probekörper erfolgte in der Holzwerkstatt der Fachgruppe 4.1.

Im weiteren Verlauf wurden acht zusätzliche Kiefernholz-Probekörper (K219.1 bis .8) geleimt. Diese dienten einerseits Lagerungstests unter verschiedenen klimatischen Bedingungen, andererseits wurden in zwei von ihnen Fehlstellen eingebracht. Bild 33 zeigt exemplarisch einen dieser Probekörper ohne Fehlstelle. Die Probekörper haben alle die Maße 48 cm x 12,4 cm x 9,1 cm (L x T x R).



Bild 33 Kiefernholz-Probekörper (Kiefer Serie 2, K219.1-.8)



Bild 34 Großer Kiefernholz-Probekörper (x1124)

Zusätzlich wurde ein weiterer großer Probekörper aus Kiefernholz (x1124) geklebt. Dieser ist in Bild 34 zu sehen und hat die Abmessungen 49,5 cm x 30,1 cm x 14,5 cm.

Buchenholz-Probekörper [Buche1]

Neben dem Kiefernholz wurde in der Anfangsphase auch Buchenholz nach dem gleichen Schema wie Kiefer verarbeitet.

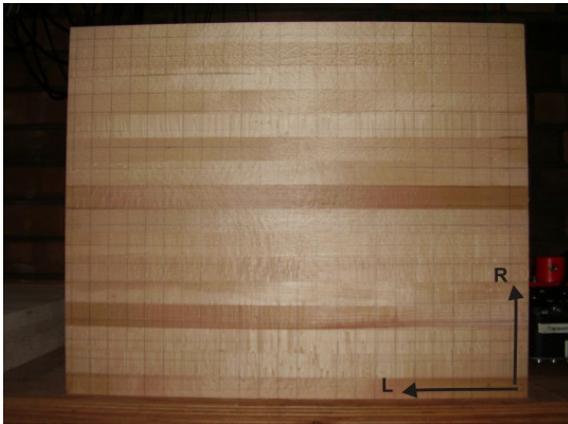


Bild 35 Buchenholz-Probekörper (Buche1), Draufsicht



Bild 36 Buchenholz-Probekörper (Buche1), Seitenansicht

Der Probekörper Buche1 wurde mit Stäben der der Abmaße 5 cm x 2,5 cm x 50 cm verleimt und hat eine Größe von $L = 49$ cm, $R = 40$ cm und $T = 15$ cm. In Bild 35 und Bild 36 ist der noch intakte Probekörper Buche 1 in Draufsicht und Seitenansicht zu sehen.

Leider zeigen sich Risse entlang der Verleimung bei dem Probekörper Buche1, da die Lagermöglichkeiten während der Versuchsdurchführung mit einer Luftfeuchte von 20% und einer Heizungstemperatur von 35°C für die Holzlagerung ungeeignet sind.

Fichtenholz-Probekörper [F235, F245]

Wie bereits im Zwischenbericht angekündigt war, wurden zusätzlich Fichtenholz-Probekörper hergestellt und untersucht. Messungen an diesen Probekörper und die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 6.4 dargestellt.

Auch der Fichtenholz-Probekörper F235 ist aus Stäben zusammengeleimt. Die Abmessungen sind: 70 cm in axialer (Längs-) Richtung (L), 40 cm in tangentialer Richtung (T) und 10 cm in radialer Richtung (R).



Bild 37 Fichtenholz-Probekörper (F235), Abmessungen $L = 70$ cm, $T = 40$ cm, $R = 10$ cm

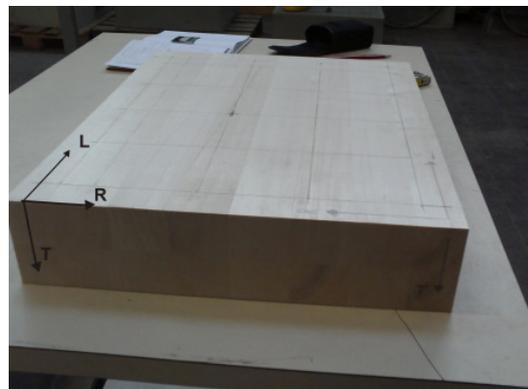


Bild 38 Fichtenholz-Probekörper (F245), Abmessungen $L = 50$ cm, $R = 40$ cm, $T = 9$ cm

Ein weiterer Fichtenholz-Probekörper (F245) hat die Abmessungen 50 cm in axialer (Längs-) Richtung (L), 9 cm in tangentialer Richtung (T) und 40 cm in radialer Richtung (R).

Die unterschiedlichen Verleimungen der Probekörper wurden gewählt, um eine Durchschallung bzw. Echo-Messungen sowohl in R-Richtung als auch in T-Richtung vornehmen zu können.

Die Fotomontage der Probekörperansicht von Fichte245 (Bild 39) zeigt, dass in diesem Fall beim Zuschneiden der Einzelteile stellenweise relativ große Krümmungsbereiche der Jahresringe auftreten. Hier sind Inhomogenitäten in der Quersteifigkeit zu erwarten. Durch die jahreszeitlich bedingte trockene Luft in der Versuchshalle bildeten sich während der langen Scannermesszeiten zunehmend Risse, die sich unter feuchter Lagerbedingung teilweise wieder schlossen.

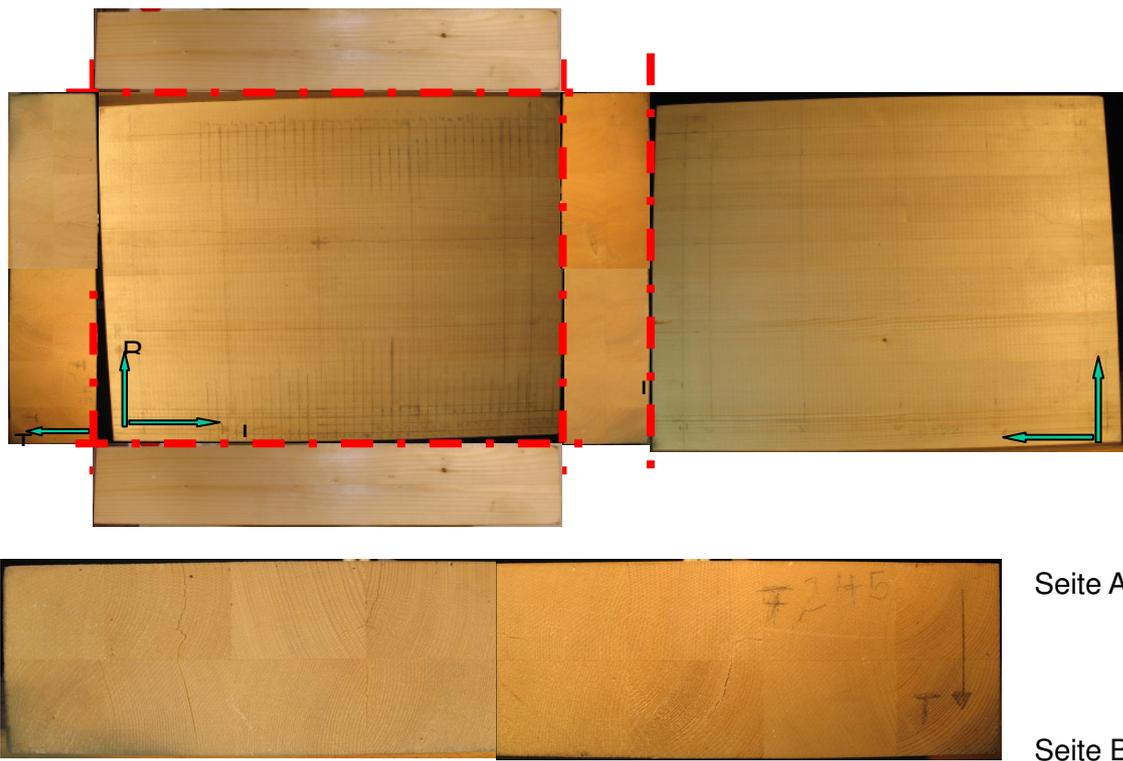


Bild 39 Fotomontage des Probekörpers F245. Oben: Draufsicht, unten: Ansicht Stirnseite (vergrößert)

Probekörper mit Fehlstellen

Vor allem in die Probekörper x1124 (Kiefer) und F245 (Fichte) wurden künstliche Fehlstellen eingebracht, so dass untersucht werden konnte, wie sich diese Fehlstellen im rekonstruierten Bild der Messdaten abbilden.



Bild 40 Kieferholzprobekörper x1124 mit eingefügten Fehlstellen auf der Rückseite

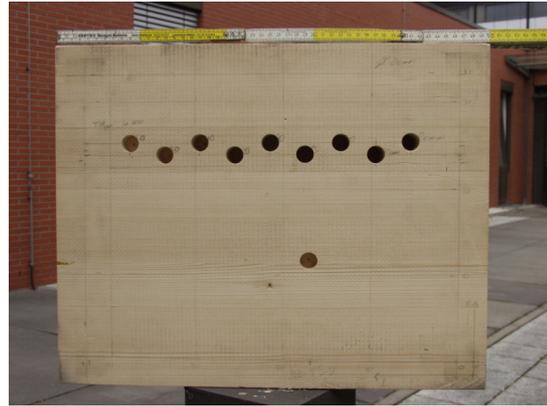


Bild 41 Fichtenholzprobekörper F245 mit eingefügten Fehlstellen auf der Rückseite

Die Fehlstellen wurden im Verlaufe der Untersuchungen zwischen den einzelnen Messungen verändert.

Fichtenholz-Probekörper [F262]

Um Randeffekte weiter zu minimieren wurde ein größerer Probekörper aus Fichtenholz angefertigt. Wiederum wurden Stäbe verleimt, dass insgesamt die Abmessung $L = 111 \text{ cm} \times R = 70 \text{ cm} \times T = 12 \text{ cm}$ entstanden. Die Stäbe wurden aus ca. 60 mm dicken Brettern in einer aufwendigen Prozedur so herausgeschnitten, dass sie einen möglichst geringen Anteil an Jahresringkrümmung enthielten. Der Probekörper besteht aus 3 Schichten.

Die Experimente konnten aus Zeitgründen nicht mehr im Rahmen des Vorhabens abgeschlossen werden. Die erzielten Ergebnisse werden Eingang in weitere Veröffentlichungen bzw. eine Bachelor-Arbeit finden.

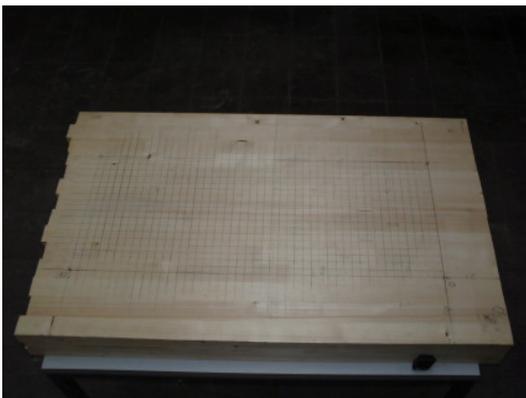


Bild 42 Fichtenholz-Probekörper (F262), Abmessungen $L = 111 \text{ cm}$, $R = 70 \text{ cm}$, $T = 12 \text{ cm}$

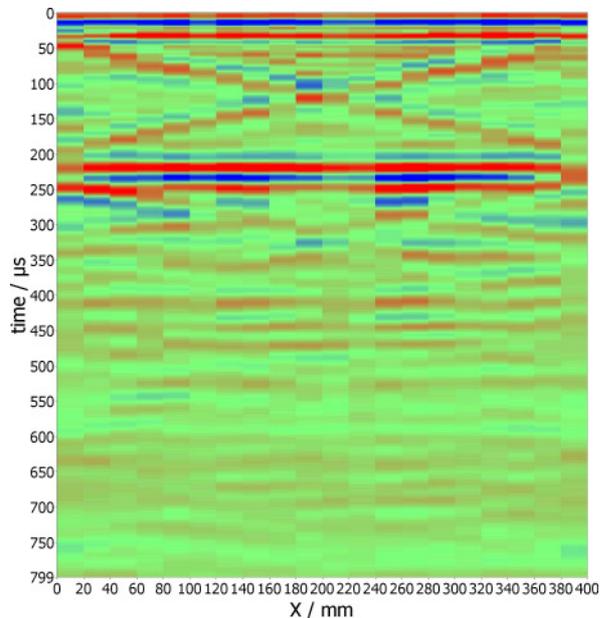


Bild 43 Fichtenholzprobekörper F262 mit eingefügten Fehlstellen auf der Rückseite

6.2 Ergebnisse für Buchenholz

Die Beschreibung der verwendeten Probekörper ist in Kapitel 6.1 beschrieben. In Bild 35 und Bild 36 sind die Probekörper abgebildet.

Wie bereits im Zwischenbericht erwähnt wurden am Bucheprobekörper aus Bild 35 und Bild 36 die ersten Echo-Messungen vorgenommen. Bild 44 zeigt die zugehörigen Messdaten. Die Rückwand des Probekörpers ist klar zu erkennen. Außerdem sind diagonale Reflexionen der Oberflächenwellen zu sehen. Diese wurden vor der SAFT-Rekonstruktion unterdrückt. Bild 45 zeigt das Rekonstruktionsergebnis. Die Rückwand wird in 12,5 cm abgebildet. Damit liegt sie 2 cm flacher als der Probekörper eigentlich dick ist. Dies ist vermutlich auf die Nutzung der vorhandenen theoretischen Geschwindigkeitsinformationen nach [25] zurückzuführen.



Mit Transversalwellenköpfen bei 50 kHz wurde der Buchenholzprobekörper (Buche1) in R-Richtung den Ultraschall eingeschallt und in T-Richtung polarisiert. Das Rückwandecho war gut erkennbar [42]. Die Ergebnisse konnten mittels 3D-SAFT-Rekonstruktion bestätigt werden, was in Bild 45 zu sehen ist.

Bild 44 Messdaten Bucheprobekörper (Buche 1)

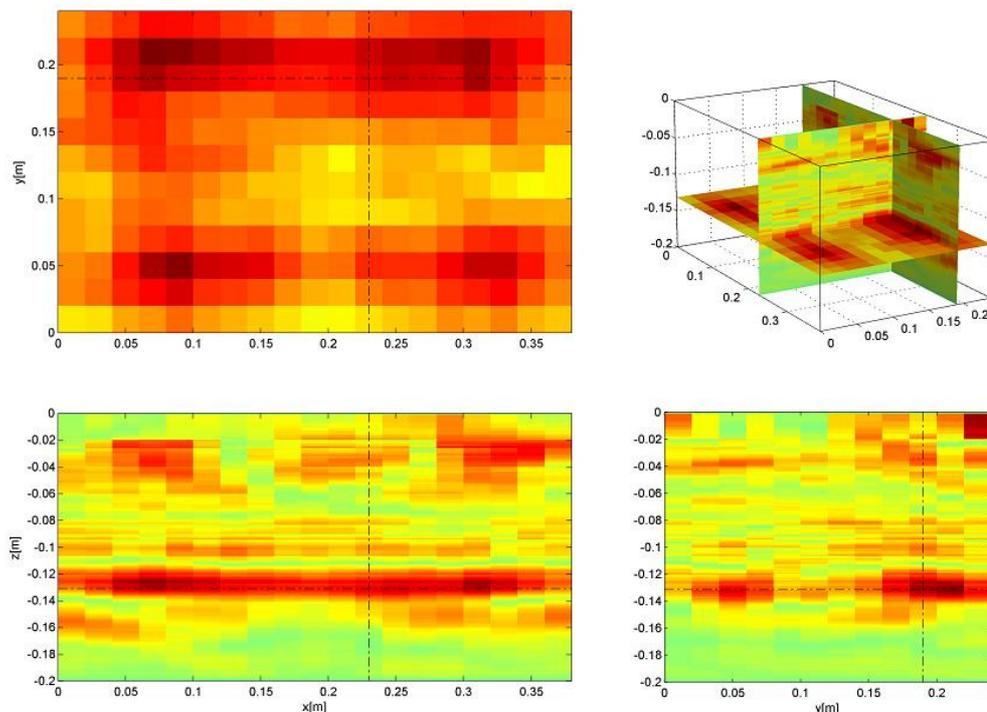


Bild 45 3D-SAFT-Rekonstruktion Buche

6.3 Ergebnisse für Kiefernholz

Die Beschreibung der Probekörper für die im Folgenden beschriebenen Messungen sind in Kapitel 6.1 zu finden.

SAFT-Rekonstruktionen

Für die Rekonstruktionen mit SAFT wurde das oben erwähnte Programm der Universität Kassel *inter-saft* genutzt.

Erste SAFT-Rekonstruktionen von Messungen an Kiefernholz

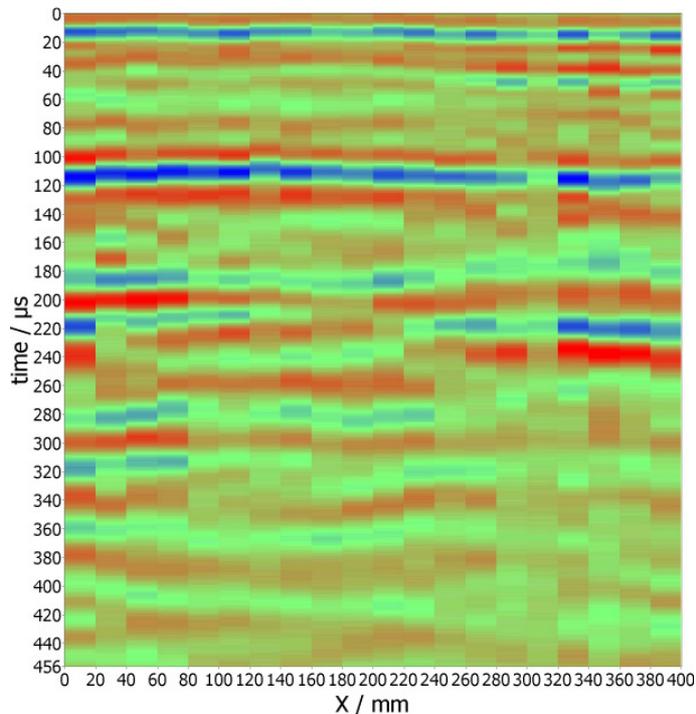


Bild 46 Messdaten Kiefernholz-Probekörper (Kiefer Serie 2)

Auch am Kiefernholz-Probekörper aus Bild 33 wurden Echo-Messungen vorgenommen. Bild 46 zeigt die Messdaten. Die Rückwand ist klar zu erkennen. Oberflächenwellen sind nicht signifikant vorhanden.

Bild 47 zeigt das mit 3D-SAFT rekonstruierte Ergebnis. Die Rückwand ist hier bei 7,5 cm zu sehen. Bei einer Probekörperdicke von 7 cm ist dieses Rekonstruktionsergebnis sehr genau. Abweichungen durch die Nutzung der theoretischen Geschwindigkeiten sind aber nicht ausgeschlossen.

Nach den ersten Messungen wurde eine Bohrung mit einem Durchmesser von 2 cm in den Kiefernholz-Probekörper eingebracht, was in Bild 48 zu sehen ist.

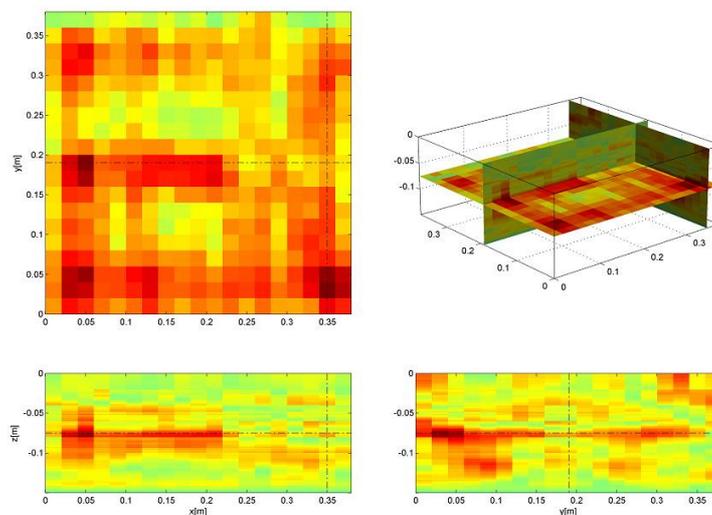


Bild 47 3D-SAFT-Rekonstruktion Kiefernholz (Kiefer 1)



Bild 48 Kiefernholz-Probekörper mit Bohrung (Kiefer 1)

In den Messdaten ist die Bohrung nicht eindeutig zu identifizieren. In Bild 49, der SAFT-Rekonstruktion, ist die Bohrung hingegen abgebildet, allerdings ist sie nicht eindeutig von Störanzeigen zu unterscheiden. Des Weiteren wird in der Rekonstruktion die Rückwand unter der Bohrung abgeschattet, was ein weiteres Indiz dafür ist, dass es sich beim markierten Bereich wirklich um die Bohrung handelt. Die Messungen an Kiefer 1 ist Gegenstand der ersten Teilveröffentlichung aus dem Vorhaben [42].

abgeschattet, was ein weiteres Indiz dafür ist, dass es sich beim markierten Bereich wirklich um die Bohrung handelt. Die Messungen an Kiefer 1 ist Gegenstand der ersten Teilveröffentlichung aus dem Vorhaben [42].

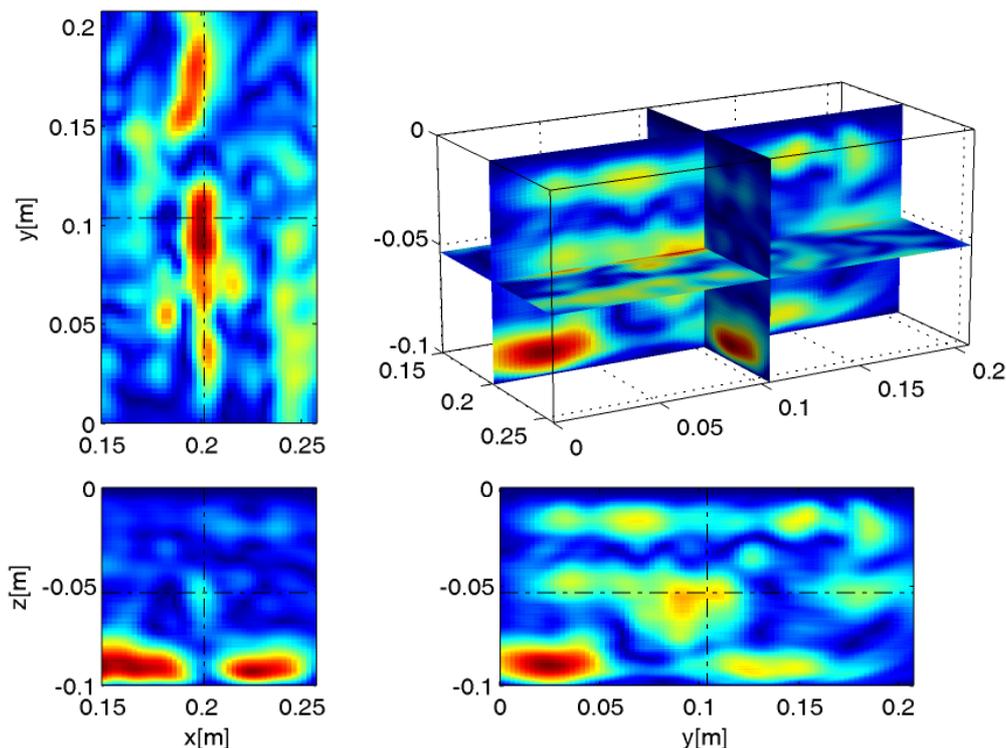


Bild 49 3D-SAFT-Rekonstruktion Kiefernholz-Probekörper mit Bohrung. Abbildung der Bohrung (siehe Fadenkreuz), allerdings im C-Bild mit mäßigem Kontrast

Gefräste Fehlstelle in kleinem Kiefernholz-Probekörper



Bild 50 Kiefernholz -Probekörper mit L-förmiger Fehlstelle (K219.7)

Nachdem die Rückwand eines Probekörpers erfolgreich in einer SAFT-Rekonstruktion abgebildet werden konnte, wurde die Detektierbarkeit einer kleineren Fehlstelle untersucht. Dazu wurde ein Probekörper mit Testleimungen (Bild 33) genutzt. In diesen wurde eine L-förmige Fehlstelle gefräst, die eine Maximalausdehnung von 6 cm x 4 cm aufweist. Der

Probekörper ist in Bild 50 zu sehen.

Die Echo-Messung wurde von der der Fehlstelle gegenüber liegenden Seite aus vorgenommen. Es wurde also in radialer Richtung eingeschallt und in longitudinaler Richtung polarisiert. Die Messdaten in Bild 51 zeigen wieder die starken diagonalen Reflexionen der Oberflächenwellen in Faserrichtung. Diese wurden vor der SAFT-Rekonstruktion soweit wie möglich unterdrückt.

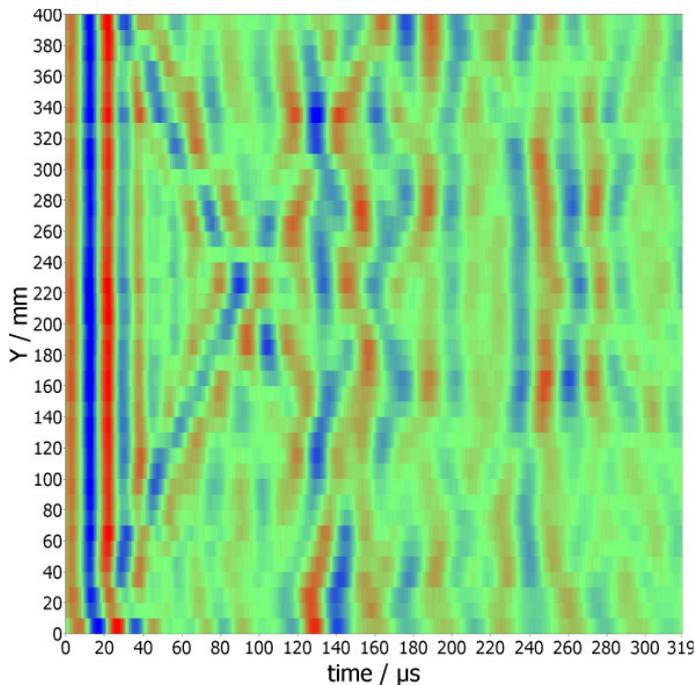


Bild 52 zeigt die mit 3D-SAFT ausgewerteten Daten. Zu erkennen ist die Rückwand, die teilweise unterbrochen ist. Die L-förmige Fehlstelle zeichnet sich nicht eindeutig ab. Da sich die verbleibenden Oberflächenwellen mit den erwarteten Störstellen- und Rückwandechos im ähnlichen Tiefenbereich befinden, ist nicht sicher, ob es sich in der Rekonstruktion um die Fehlstelle oder ein Artefakt aus der Kreuzung der Oberflächenwellen handelt. Offensichtlich sind größere Probekörper erforderlich (siehe nachfolgendes Kapitel).

Bild 51 Messdaten Kiefernholz -Probekörper mit L-förmiger Fehlstelle (eingefräßt)

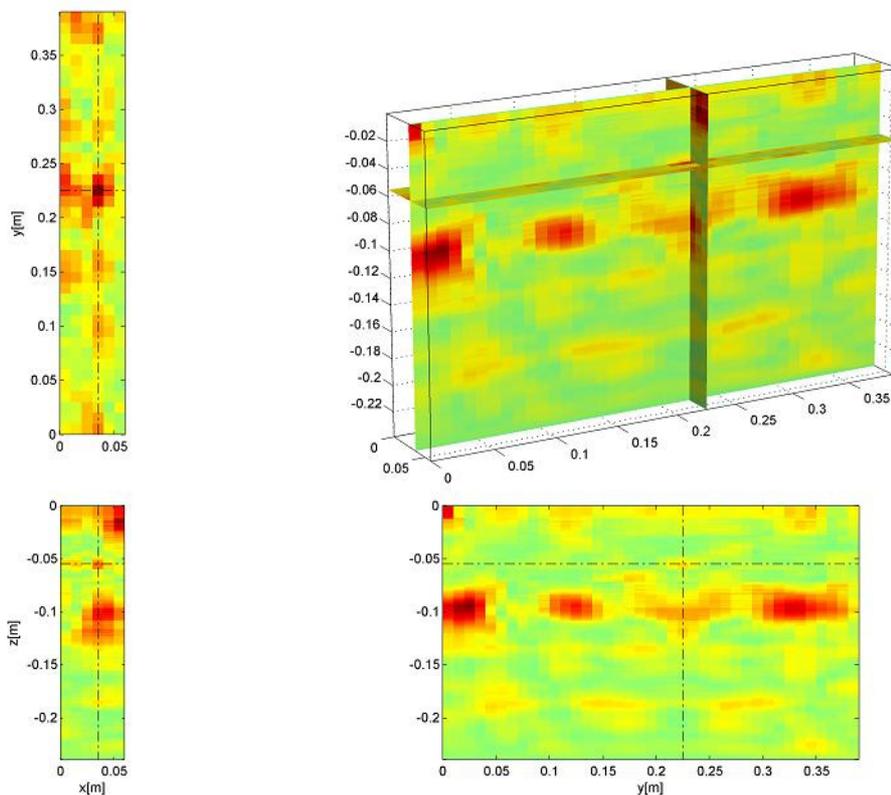


Bild 52 3D-SAFT-Rekonstruktion der L-förmiger Fehlstelle

Gefräste Fehlstelle in einem großen Kiefernholz-Probekörper (PK x1124)

In den Probekörper aus Bild 34 (Maße 49,5 cm x 30,1 cm x 14,5 cm) wurde ebenso eine L-förmige Fehlstelle mit der Größe 7,5 cm x 4,3 cm gefräst. Diese ist in Bild 53 zu sehen. Neben der L-förmigen Fehlstelle wurde noch eine Bohrung eingebracht, auf die an dieser Stelle aber nicht näher eingegangen wird. Diese Untersuchungen fanden in der Anfangsphase der Laufzeit des Vorhabens statt. Sie sind hier dokumentiert, um den Verlauf des erreichten Fortschrittes beim Abbilden von Reflektoren zu dokumentieren.



Bild 53 Großer Kiefernholz-Probekörper (Pk x1124) mit L-förmiger Fehlstelle (Rückseite)

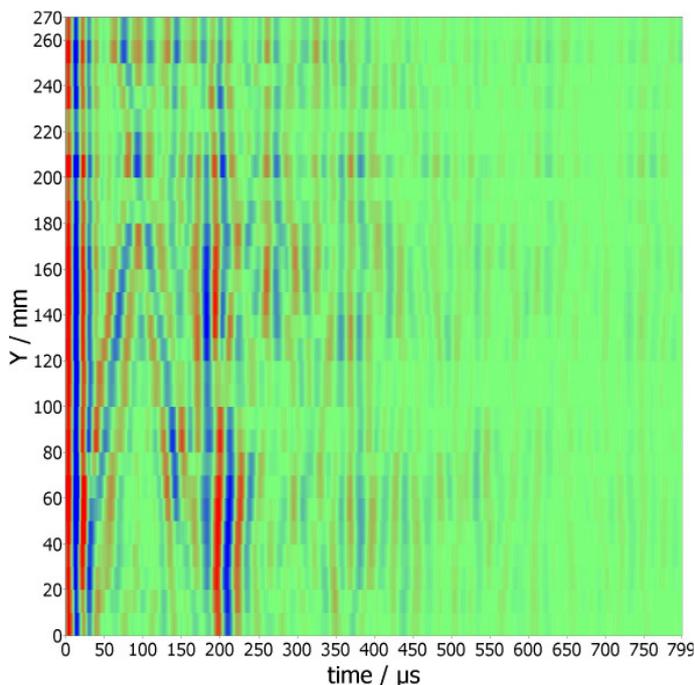


Bild 54 Messdaten großer Kiefernholz-Probekörper mit L-förmiger Fehlstelle (eingefräßt)

Die Messdaten wurden wiederum von der gegenüberliegenden Seite aufgenommen. Bild 54 zeigt diese Daten. Auch hier sieht man deutlich die diagonalen Reflexionen der Oberflächenwellen, welche vor der SAFT-Rekonstruktion entfernt wurden. Diese ist in Bild 55 zu sehen. Zu erkennen ist die unterbrochene Rückwand und nur andeutungsweise die Fehlstelle (Markierung der Rückwand mit Cursor).

Bild 56 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.

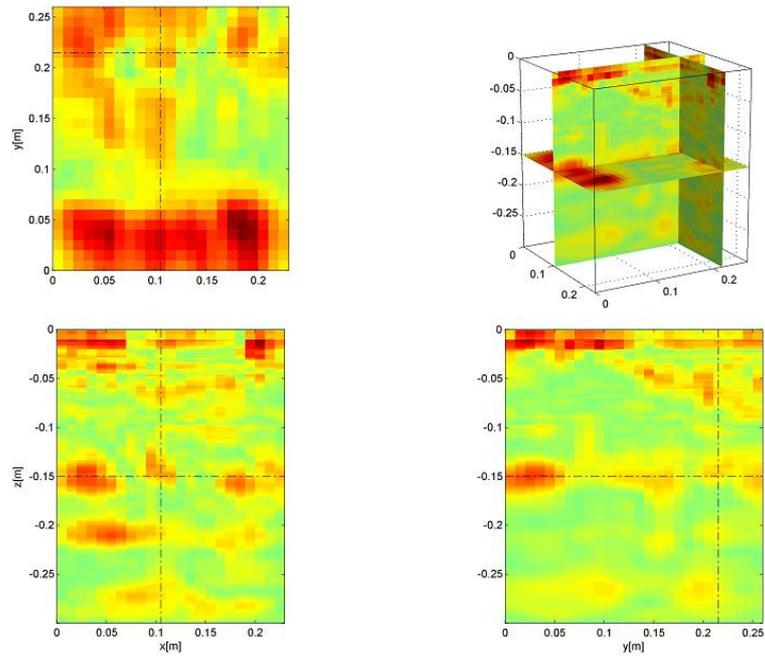


Bild 55 3D-SAFT-Rekonstruktion der L-förmigen Fehlstelle am großen Kiefernholz-Probekörper

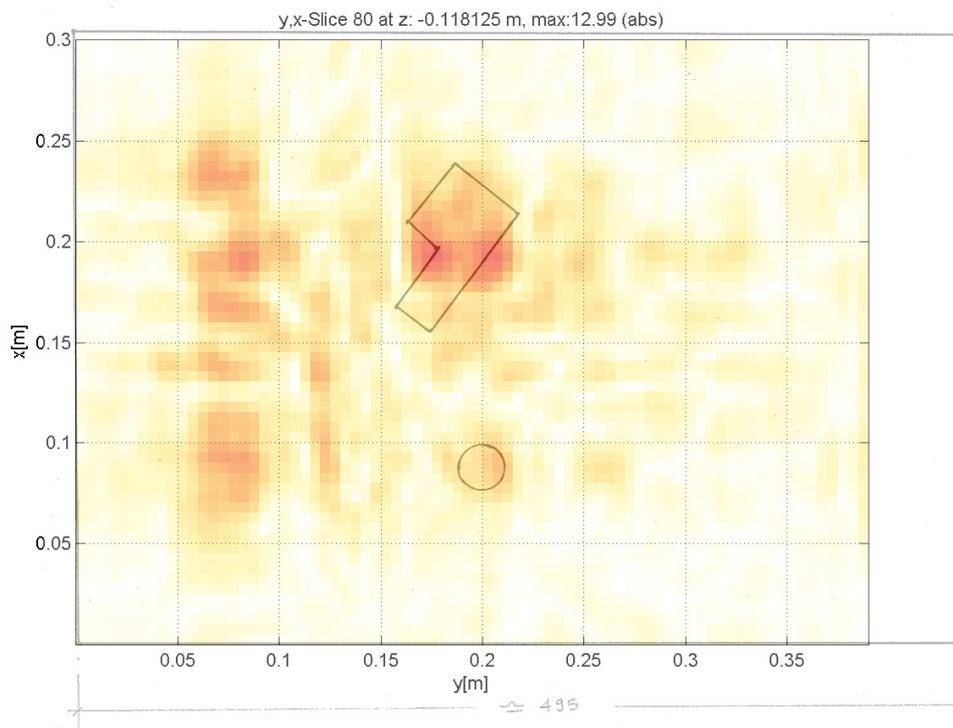


Bild 56 Tiefenschnitt (C-Bild, Zeitscheibe) einer 3D-SAFT-Rekonstruktion, Tiefe $z = 118 \text{ mm}$ mit eingezeichneter Fehlstellenlage

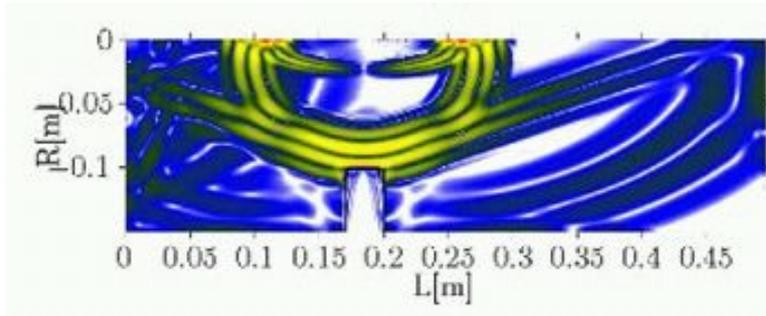


Bild 57 Kiefer x1124: Kopfwellen erzeugt durch Anregung der Polarisation TL in Kiefernholz (gemäß der Modellierung Kapitel 4)

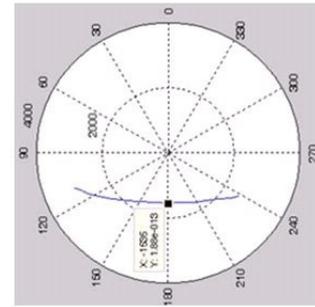
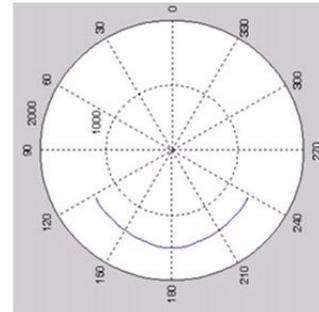


Bild 58 Polardiagramm der Geschwindigkeiten in L- (oben)– und T-Richtung (unten)



Um die Vorgänge der Wellenausbreitung bei der geschilderten Messung besser zu verstehen, wird nun auf die Erkenntnisse zurückgegriffen, wie sie in Kapitel 4.3 (3D- EFIT von Oberflächenanregung mit Fehlstellen) beschrieben sind. Wie in Bild 57 noch einmal dargestellt ist, wird bei der Schwerwellenanregung mit der Polarisationsrichtung L zusätzlich eine Oberflächenwelle in L-Richtung angeregt. Daraus bildet sich im Volumen eine schräglaufige Kopfwelle ähnlich einer ebenen Welle, die mit der (langsameren) Scherwelle verbunden ist. In Bild 59 ist im rechten B-Bild die Hyperbel des unten liegenden Reflektors zu erkennen, wie sie sich nach Filterung der Oberflächenwellen deutlich ergibt. Daraus ergibt sich nun experimentell das Polardiagramm in Bild 58.

Bild 56 zeigt das Ergebnis der Rekonstruktionsrechnung mit diesem experimentell ermittelten Geschwindigkeitsprofil. Damit wird eine geometrisch richtige Abbildung des Reflektors „L“ erreicht, und damit eine deutliche Verbesserung gegenüber der Rekonstruktion mit der Beschränkung auf Volumenwellen (vgl. Bild 56).

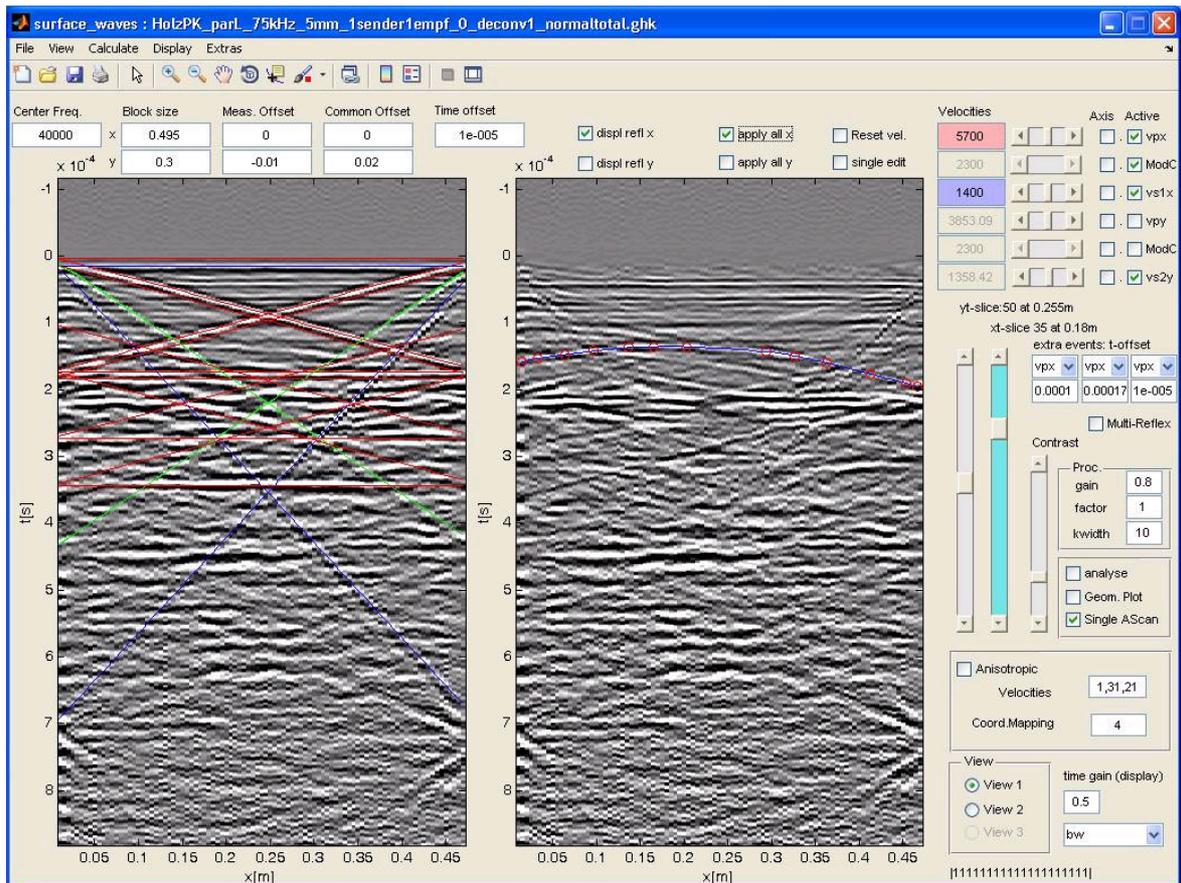


Bild 59 Auswertung der Messung an Kiefernholz: Ermittlung und Unterdrückung der Oberflächenwellen (links), Identifikation der Hyperbel des Streuers (rechts)

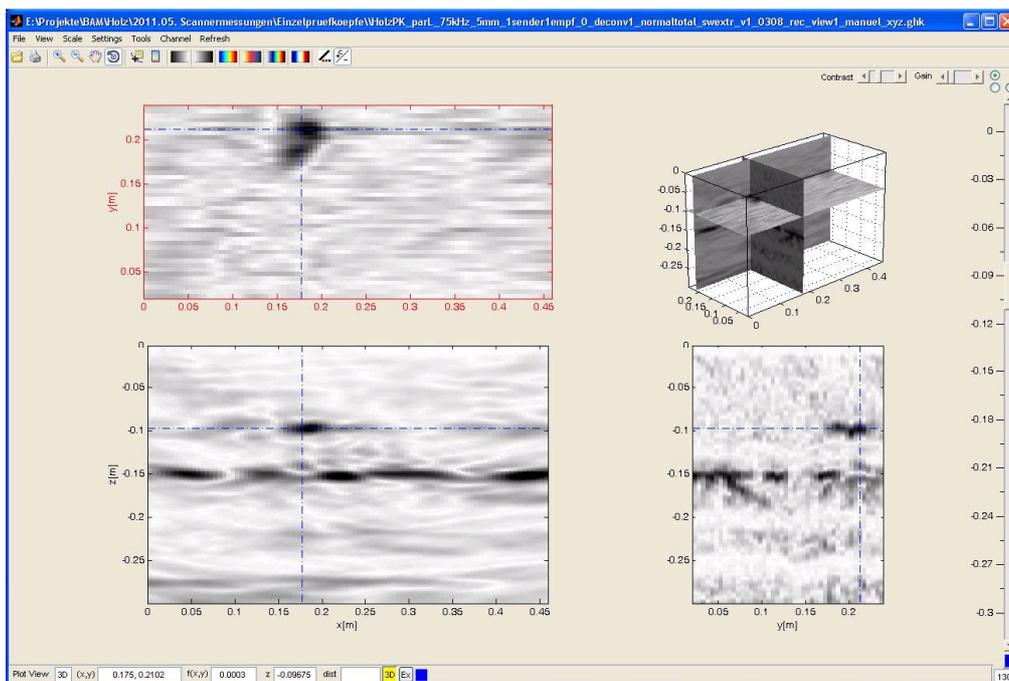


Bild 60 Kiefer x1124: Ergebnis der Rekonstruktionsrechnung mit experimentell ermittelten Geschwindigkeitsprofil

6.4 Ergebnisse für Fichtenholz

Messungen an dem Probekörper Fichte235

Die Messungen an dem Probekörper Fichte235 (siehe Bild 37 in Kapitel 6.1) wurden i.d.R. mittels scannendem Messaufbau durchgeführt.

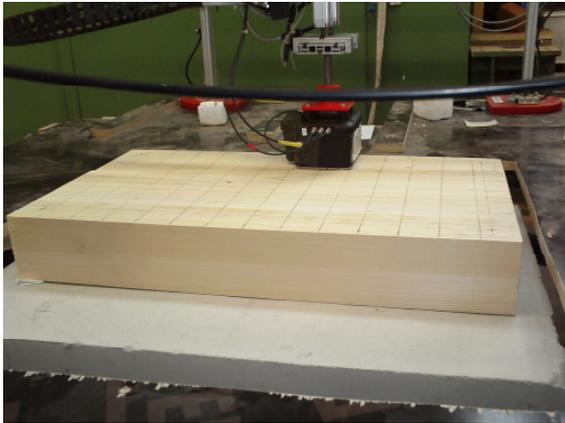


Bild 61 Scannende Messung des Probekörpers Fichte235, Echo in R-Richtung, Polarisation in L-Richtung (Prüfkopf 12+12)

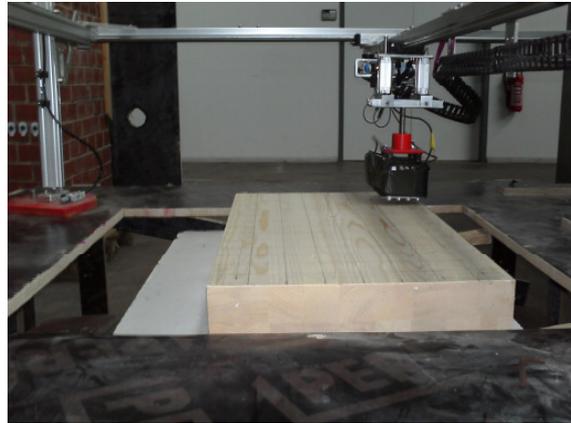


Bild 62 Scannende Messung des Probekörpers Fichte235, Echo in R-Richtung, Polarisation in T-Richtung (Prüfkopf 12+12)

In der Messrichtung R (radial) und der Polarisationsrichtung L (Längsachse) ist in der B-Bild-Darstellung in Bild 63 bei $t = 175 \mu\text{s}$ ein Rückwandecho erkennbar (bei Berücksichtigung des Einsatzpunktes liegt der Rückwandreflex bei $t = 160 \mu\text{s}$.) Das Echo wird beeinflusst durch die starken Oberflächenwellen und deren Reflexion in beide Richtungen.

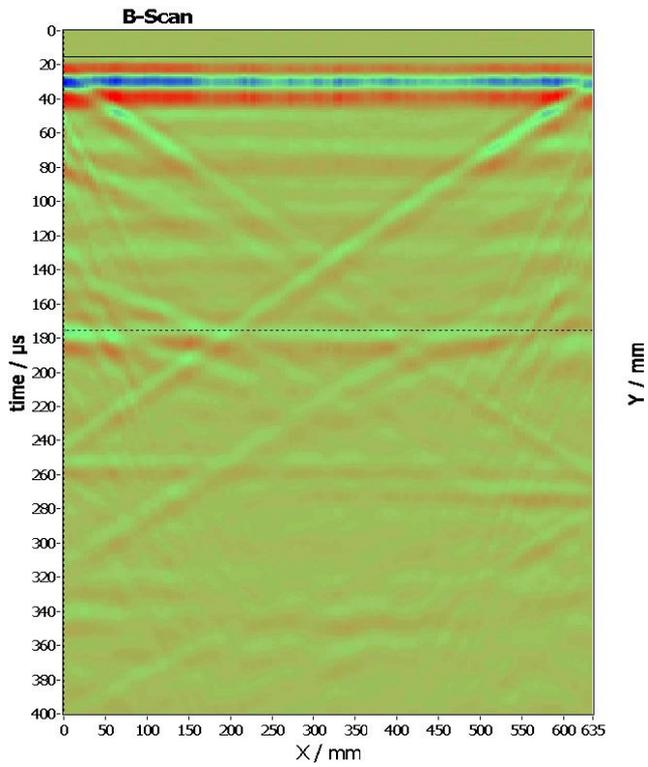
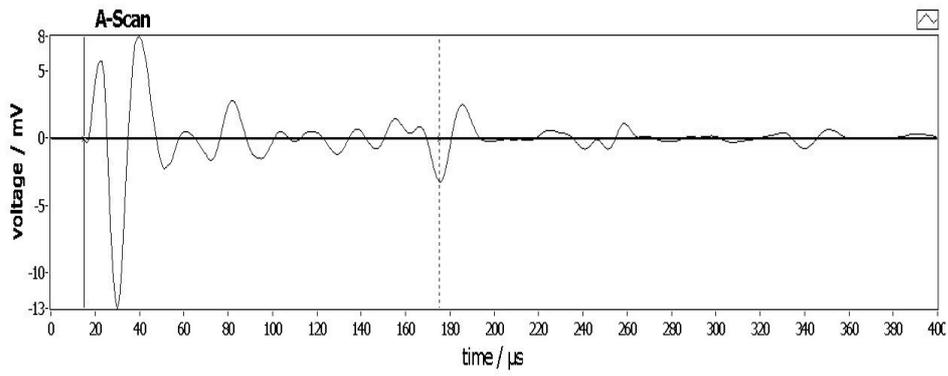


Bild 63 Messergebnisse für den Probekörper Fichte235 mit A-Bild (oben) und B-Bild (unten) (Prüfkopf 12+12)

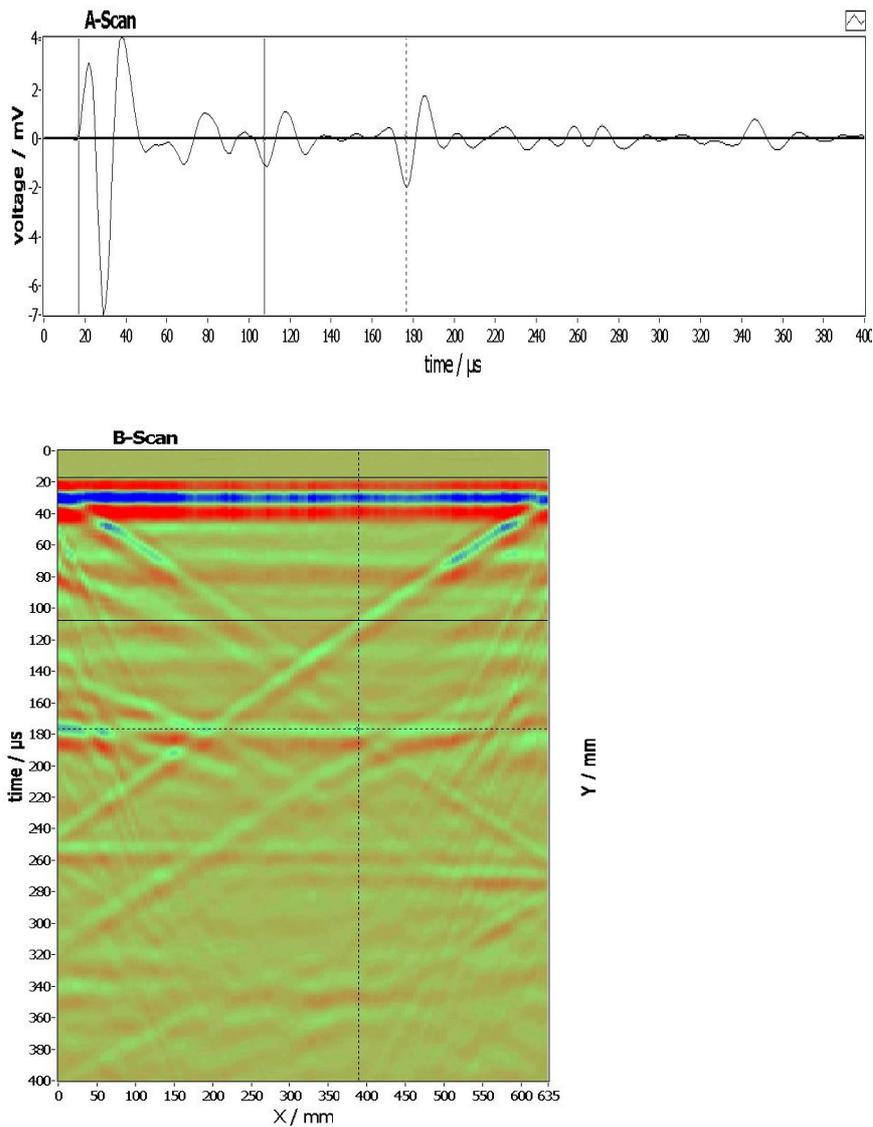


Bild 64 Messergebnisse für den Probekörper Fichte235 mit A-Bild (oben) und B-Bild (unten) mit einem Streuer, welcher den Wellenverlauf beeinflusst (Prüfkopf 12+12)

In einer weiteren Abbildung (s. Bild 64) zeigen sich Störungen im Verlauf des B-Bildes, was auf einen vorhandenen Streuer hindeutet. Ein Hinweis hierfür können die andeutungsweise vorhandenen Hyperbel im B-Bild als auch die Schwankungen der Messspannung im A-Bild sein. Diese Störungen könnten auch von Rissen stammen, die sich zu einem späteren Zeitpunkt an dem Probekörper zeigten (s. Bild 65). Die Rissbildung ist wiederum auf die Klimabedingungen in der Versuchshalle zurückzuführen, bei einer Luftfeuchtigkeit von 20 % und einer Temperatur von 32° C in der Halle sind die Lagerbedingung für Holz weit entfernt von den optimalen Lagerbedingungen für Holz mit einer Luftfeuchte von 60-70 % und einer Temperatur von 20° C.



Bild 65 Risse in dem Probekörper Fichte235 parallel zur R-Richtung

Scannermessungen am Probekörper Fichte245

Der Probekörper Fichte245 (s. Bild 38 in Kapitel 6.1) wurde so geleimt, dass die Messung in T-Richtung erfolgen konnte und die Polarisation in L- oder R-Richtung zeigt (siehe auch Bild 39).

Bei der Referenzmessung mit der Polarisation in L-Richtung ist im B-Bild bei $t = 137 \mu\text{s}$ 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. In Bild 67 sind zur Veranschaulichung die Oberflächenwellen eingezeichnet.

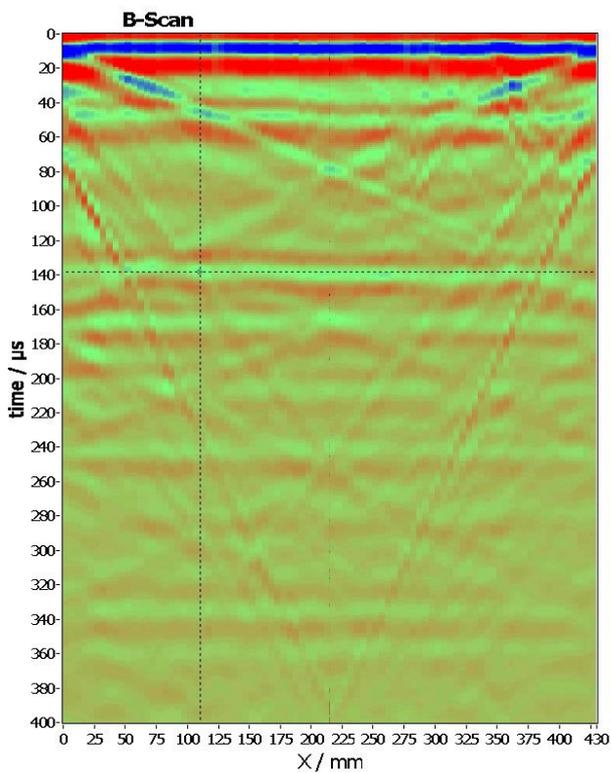
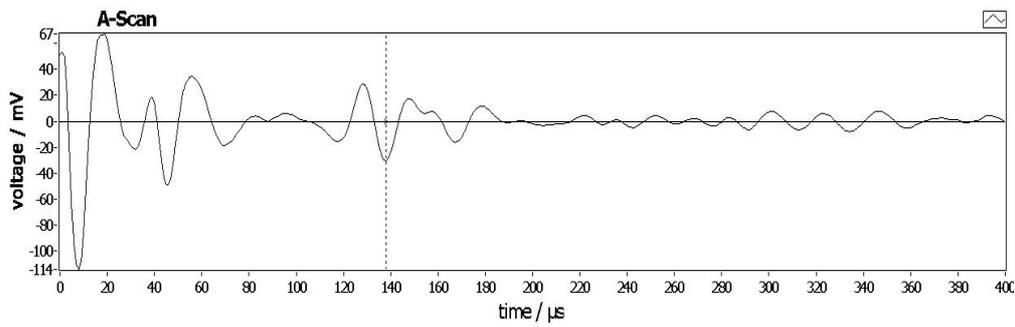


Bild 66 Messergebnisse für den Probekörper Fichte245 mit A-Bild (oben) und B-Bild (unten) (12+12)

Die Messungen ohne Fehlstellen zeigen in der TL-Polarisation eine Echoanzeige, die auf ein Rückwandecho der Kopfwellen hindeutet. Durch die geometrische bedingte Tatsache, dass dicht bei diesem Echo die Anzeige der Vielfachen der Oberflächenwellen liegt (Unterseite des sog. Reflexionskreuzes), ist die Aussagesicherheit jedoch noch nicht befriedigend.

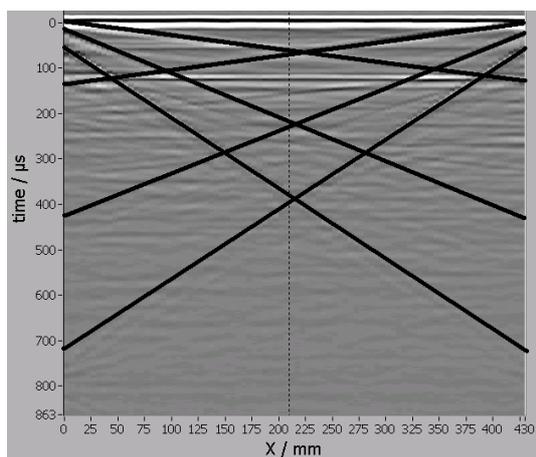


Bild 67 B-Bild der Messung an Fichte245, Messrichtung T, Polarisation L, eingezeichnet sind die Oberflächenwellen

Messungen mit zusätzlichen Kreisscheibenreflektoren am Probekörper Fichte245

In den Probekörper wurde nun eine Serie von Kreisscheibenreflektoren eingebracht, um Reflexionsanzeigen aus unterschiedlichen Tiefen verfolgen zu können.

Die dafür erforderlichen Flachbodenbohrungen wurden gemäß der Darstellung in Bild 68 ausgeführt, so dass sich ein Tiefenbereich der Kreisscheiben von 10 mm bis 70 mm bei einer Dicke des Bauteils von 90 mm ergibt. Die Seite A wurde analog den Vergleichsmessungen ohne Kreisscheiben mit der Anregung in den Polarisierungen TL und TR und zusätzlich noch mit Druckwellen in z-Richtung, also der Polarisation TT durchgeführt. Dabei wurde, um die bestmögliche Ortsauflösung zu erreichen, die 1+1-Prüfkopfانordnung gewählt. Das Messfeld ist in Bild 68 rot gekennzeichnet. Alle dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf denselben Koordinatenursprung.

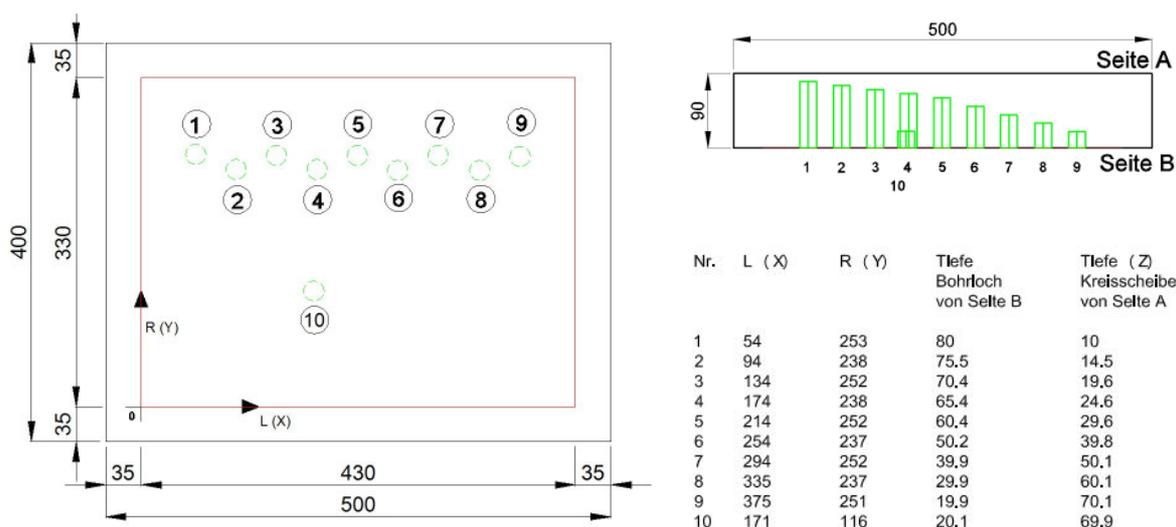


Bild 68 Kreisscheibenreflektoren im Probekörper Fichte 245 (grün) und deren Nummerierung (alle Maße in mm): Links: Ansicht der Reflektoren von der Messseite A, Roter Rahmen: Messfeld mit Koordinatenursprung. Rechts oben: Seitenansicht, Rechts unten: Tiefe der Bohrlöcher bzw. der Kreisscheiben von der Messseite

Nachfolgend sind die Rekonstruktionsergebnisse dieser Messungen in der Reihenfolge der Anregung TL, TR, TT dargestellt.

Kreisscheibenreflektoren bei Anregung mit der Polarisation TL

Zunächst sei auf das Ergebnis einer SAFT-Rekonstruktion mit vollständig isotroper Geschwindigkeit eingegangen. Bild 69 zeigt das Ergebnis, als Geschwindigkeit ist die aus den „Nullmessungen“ ermittelte Geschwindigkeit der ($c = 1400$ m/s). Das SAFT-L,T-Bild ($y:237$ mm, Linie der unteren Flachbodenreihe) zeigt das Rückwandecho deutlich bei $z = 90$ mm (Bereich 80 mm... 91 mm), die darunter liegende Vielfachreflexion der Oberflächenwellen OL1 sind wegen der erfolgten Filterung entsprechend schwach. Bei $y = 250$ mm treten Abschattungen des Rückwandechos auf, die wahrscheinlich durch die Bohrlöcher der Flachbodenbohrungen verursacht werden. Die kleineren Abschattungen bei $y = 94$ und 155 mm werden wahrscheinlich durch später diskutierte Risse verursacht.

Das SAFT-C-Bild zeigt die Projektion der Anzeigen aus dem Tiefenbereich 10 bis 50 mm, also aus dem Bereich der erwarteten Kreisscheiben-Reflexionen. Entsprechend korrelierende Anzeigen sind aber nicht zu erkennen.

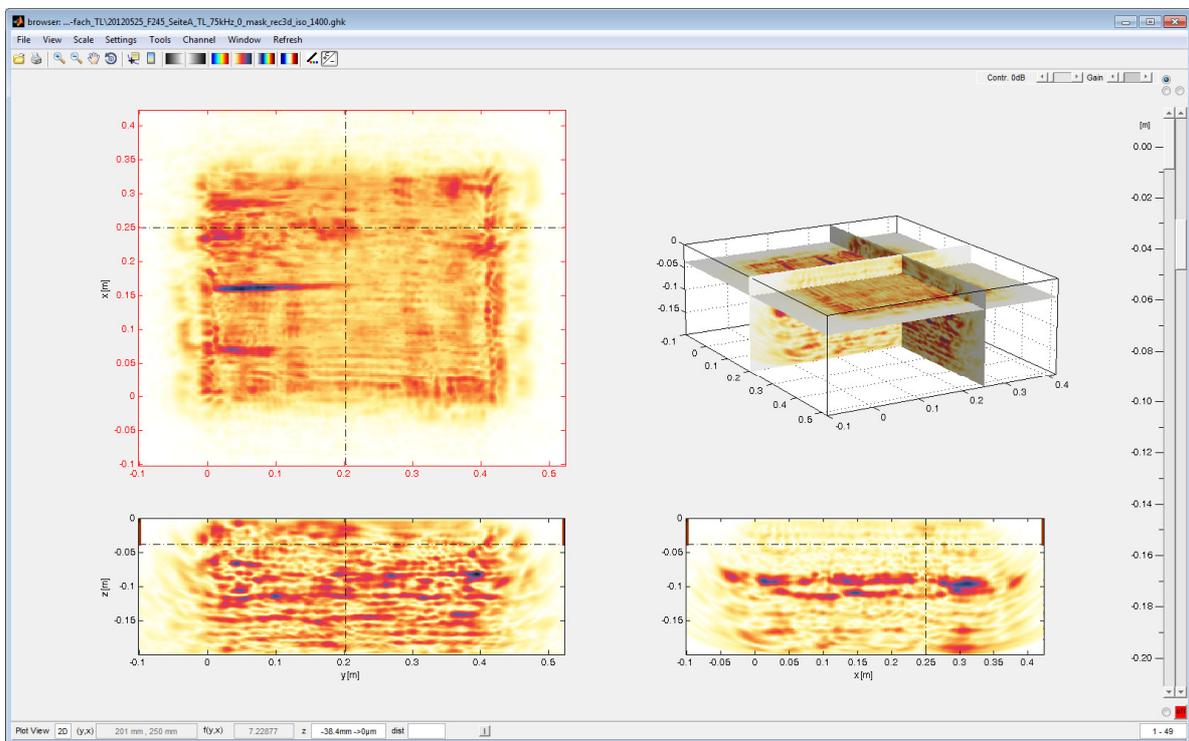


Bild 69 Fichte245, Scherwellenanregung TL, Ergebnis der FT-SAFT Rekonstruktion mit isotroper Geschwindigkeit ($c = 1400$ m/s) (Prüfkopf 1+1, wie für alle weiteren Messungen in diesem Kapitel)

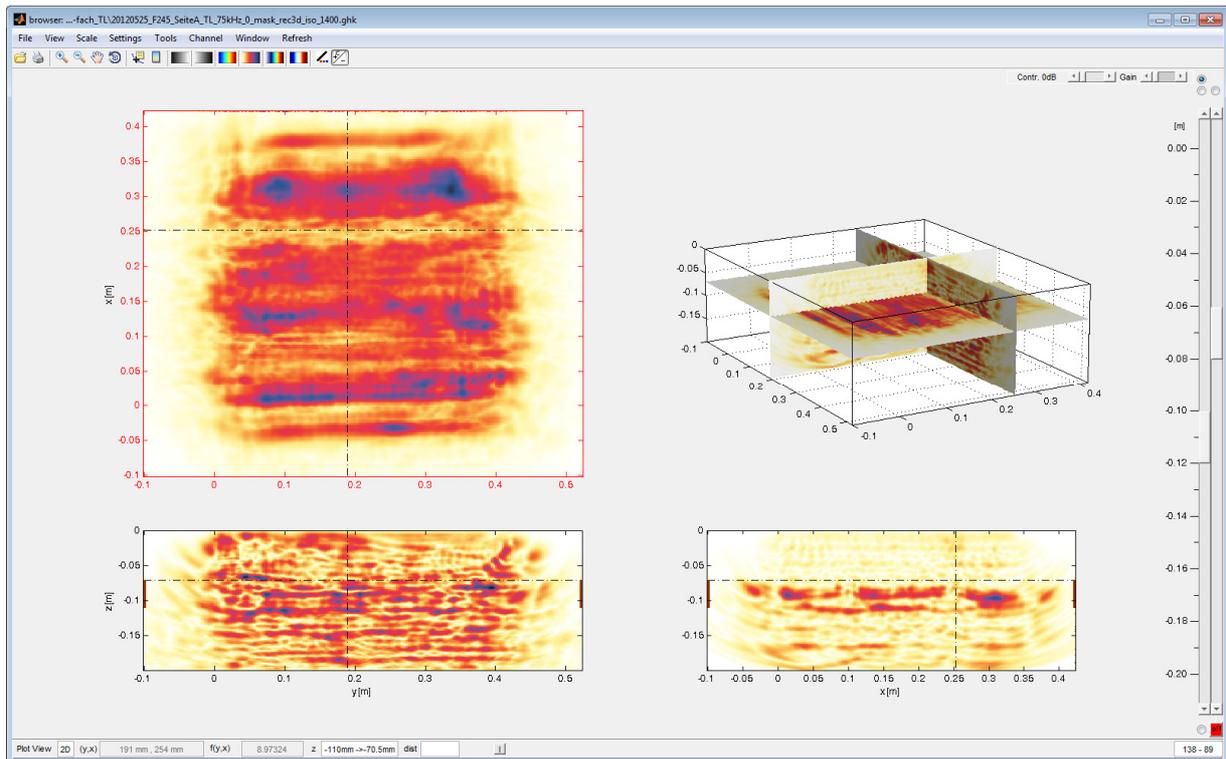


Bild 70 Fichte245, Scherwellenanregung TL, Ergebnis der FT-SAFT Rekonstruktion mit isotroper Geschwindigkeit ($c_{TL} = 1423$ m/s), Anzeige: Tiefenbereich des Rückwandechos

Bild 70 zeigt ein entsprechendes Ergebnis für den Tiefenbereich des Rückwandechos (Bereich $z = 70$ bis 110 mm). Der Bereich mit abgeschwächter Intensität um $y = 250$ mm korreliert mit den Bohrlöchern zwischen $y = 230$ und 260 mm. Wegen des zusätzlich durch die Probekörperstruktur bedingten ungleichmäßigen Rückwandechos ist diese Aussage zunächst nur ein Hinweis.

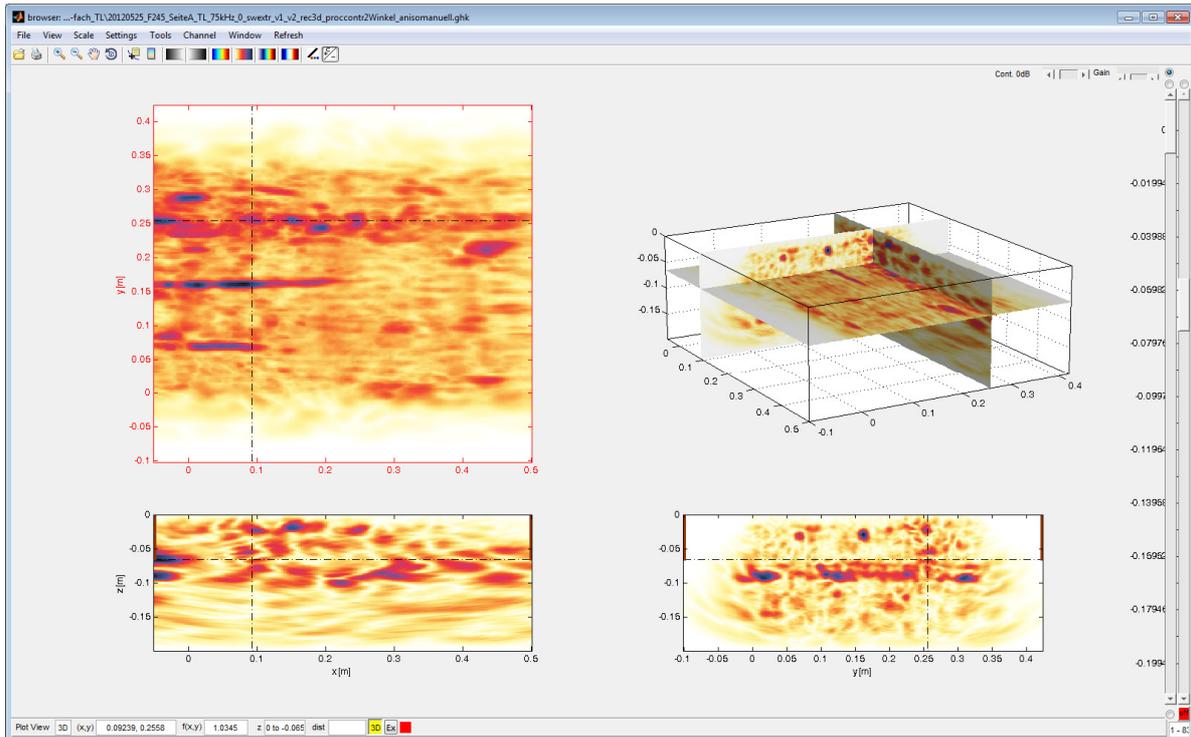


Bild 71 Fichte245, Scherwellenanregung TL, Ergebnis der SAFT Rekonstruktion mit elliptischem Profil ($c_{kT} = 1423$ m/s, L: 6029 m/s, R: 1423 m/s), Projektion bis zur dargestellten Ebene in der Tiefe von $z=70$ mm (oberhalb des Rückwandechos)

Bild 71 zeigt die SAFT Rekonstruktion desselben Datensatzes mit einem elliptischen Geschwindigkeitsprofil. Die Dispersionskurven (elliptische Verteilung der Gruppengeschwindigkeiten) wurden auf das bekannte Rückwandecho und in $R \sim y$ -Richtung so eingestellt, dass sich für die angezeigten Reflektoren eine maximale Abbildungsschärfe ergibt. Die Projektion beschränkt sich auf den Tiefenbereich bis 70 mm.

Die deutlichen linienförmigen Anzeigen in $L \sim x$ -Richtung werden als Anzeigen von dem Schallfeld zugeneigten Rissflächen oder -kanten interpretiert. In $R \sim y$ -Richtung korrelieren die Anzeigen bei $y = 70$ und 155 mm mit den Rissanzeigen im SAFT-C-Bild.

Die Anzeige bei $x/y = 92/255$ mm befindet sich im Tiefenbereich der Kreisscheibe 2 (wahre Tiefe $z = 15$ mm), die entsprechende y -Koordinate wäre jedoch 238 mm. Im ungefähren Bereich der erwarteten Kreisscheiben sind weitere Reflexionsmaxima zu erkennen, die aber ebenfalls im Detail nicht richtig sind. Es lässt sich keine bessere Anpassung der Geschwindigkeiten finden.

Kreisscheibenreflektoren bei Anregung mit der Polarisation TR

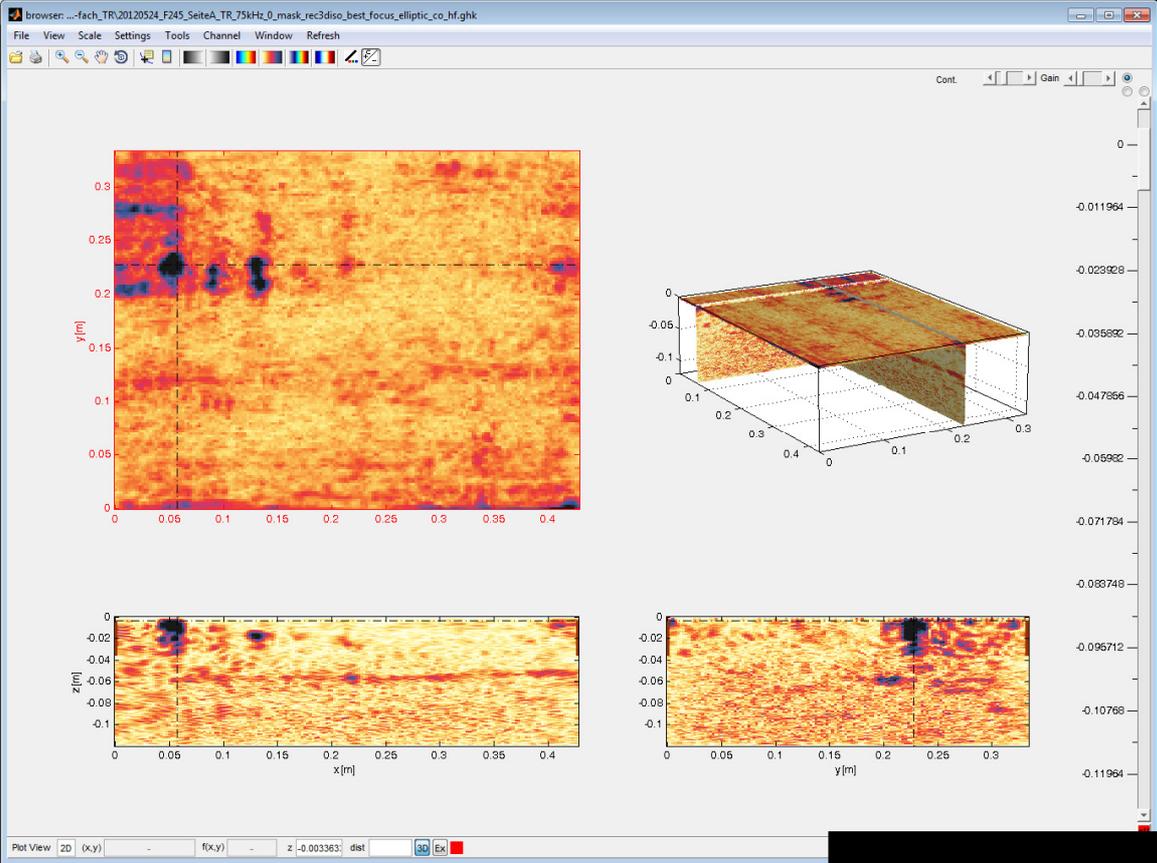


Bild 72 Fichte245, Scherwelle Polarisation TR, Ergebnis der SAFT Rekonstruktion mit elliptischem Profil (T = 545 m/s, R: 1217 m/s, L: 992 m/s). Projektion der oberflächennahen Reflexionen bis zur dargestellten Ebene in der Tiefe von z = 38 mm

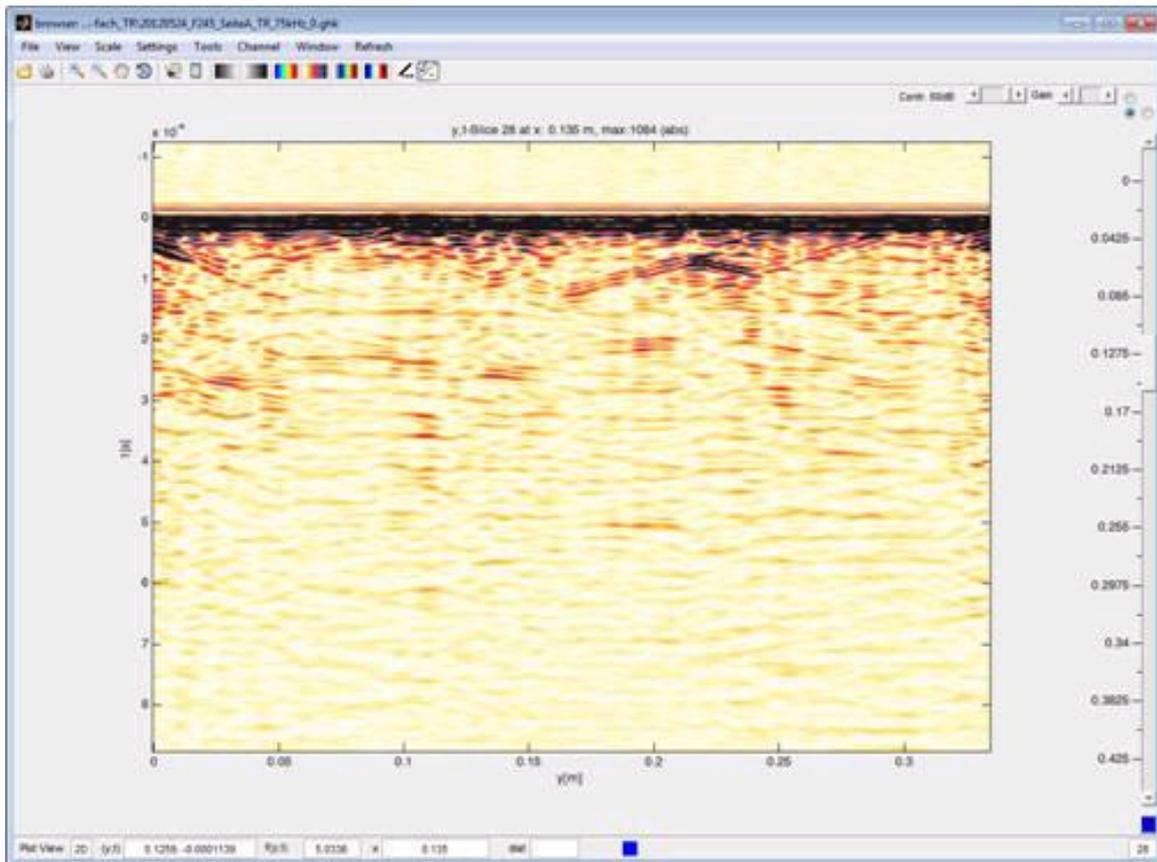


Bild 73 Fichte245, Polarisation TR, Zeit B-Bild über $R(y)$ für die Streuung an der Kreisscheibe 2

Die Ergebnisse für Scherwellenpolarisation in y -Richtung (TR) sind mit aus den Messdaten ermittelten Wellengeschwindigkeiten rekonstruiert (T: 545 m/s, R: 1217 m/s, L: 992 m/s) (Bild 72). Es handelt sich also quasi um einen lang gestreckten Ellipsoid. Im SAFT-B-x,z-Bild (bei $y = 237$ mm), sind Tiefenanzeigen der Kreisscheiben 1 bis 5 in der entsprechenden Tiefe deutlich zu erkennen. Sie sind also in der L - x -Richtung orts aufgelöst abgebildet.

In R - y -Richtung erscheint die Abbildung nur teilweise an der erwarteten Stelle und ist überwiegend „verschmiert“. Dies entsteht eventuell durch einen „cusp“ in der Gruppengeschwindigkeit oder durch die durch Wechselwirkung mit der Oberflächenwelle entstehende Kopfwelle in R -Richtung. Dies ist am gradlinigen Verlauf der Ortskurve in R -Richtung im $B(R\sim y, t)$ -Bild (Bild 73) zu erkennen.

Kreisscheibenreflektoren bei Anregung mit Druckwellen (Polarisation TT)

Die Rekonstruktion der Messung mit Druckwellen (also der Polarisation TT) wurde wie die vorherigen mit einem 1+1 - Prüfkopf durchgeführt. Die Mittenfrequenz beträgt hier $f = 75$ kHz. Die nachfolgend gezeigten Rekonstruktionen mit SAFT basieren auf zwei Geschwindigkeitsmodellen:

Gestapelte 2D-Rekonstruktion mit isotroper Geschwindigkeit entlang der L - x -Achse

3D-Rekonstruktion mit elliptischer Geschwindigkeitsnäherung (Vernachlässigung der Überschneidungen („cusps“) in den Dispersionskurven der Gruppengeschwindigkeit und Kalibrierung der Geschwindigkeiten an Kantenreflexionen, wie in Kapitel 5 erläutert).

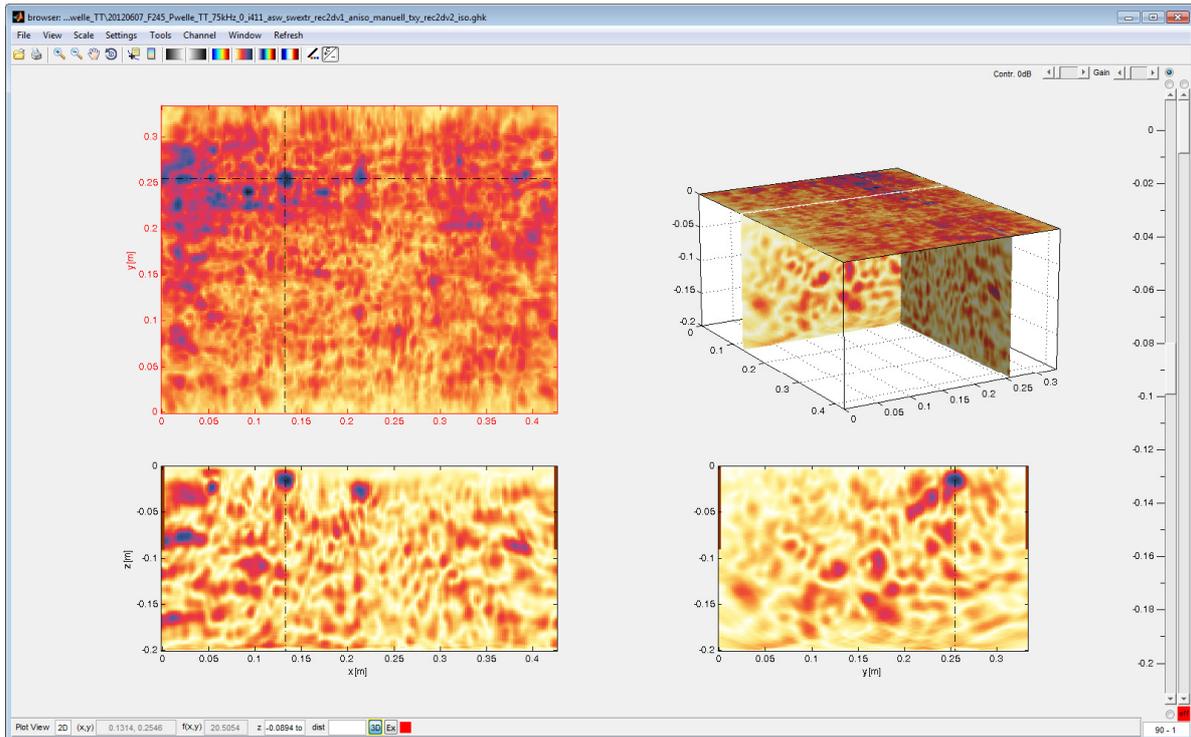


Bild 74 Fichte245, Druckwellen 75 kHz, Polarisation TT, Ergebnis der SAFT Rekonstruktion mit elliptischem Profil. Projektion der oberflächennahen Reflexionen bis zur dargestellten Ebene in der Tiefe von $z=90$ mm zur Darstellung der Kreisscheiben-Reflexionen

Bild 74 zeigt das Ergebnis mit dem elliptischen Geschwindigkeitsansatz in der dreidimensionalen Darstellung mit dem Darstellungskreuz bei der Anzeige des Flachbodenreflektors 3. Es handelt sich um eine Projektion aller Anzeigen bis $z = 90$ mm. Die Tiefenanzeige der Kreisscheibe erscheint in beiden SAFT-B-Bildern deutlich bei $z = 20$ mm. In der C-Bild-Projektion sind die Kreisscheiben 1 bis 5 deutlich zu erkennen, allerdings erscheinen auch Störanzeigen in der Nähe.

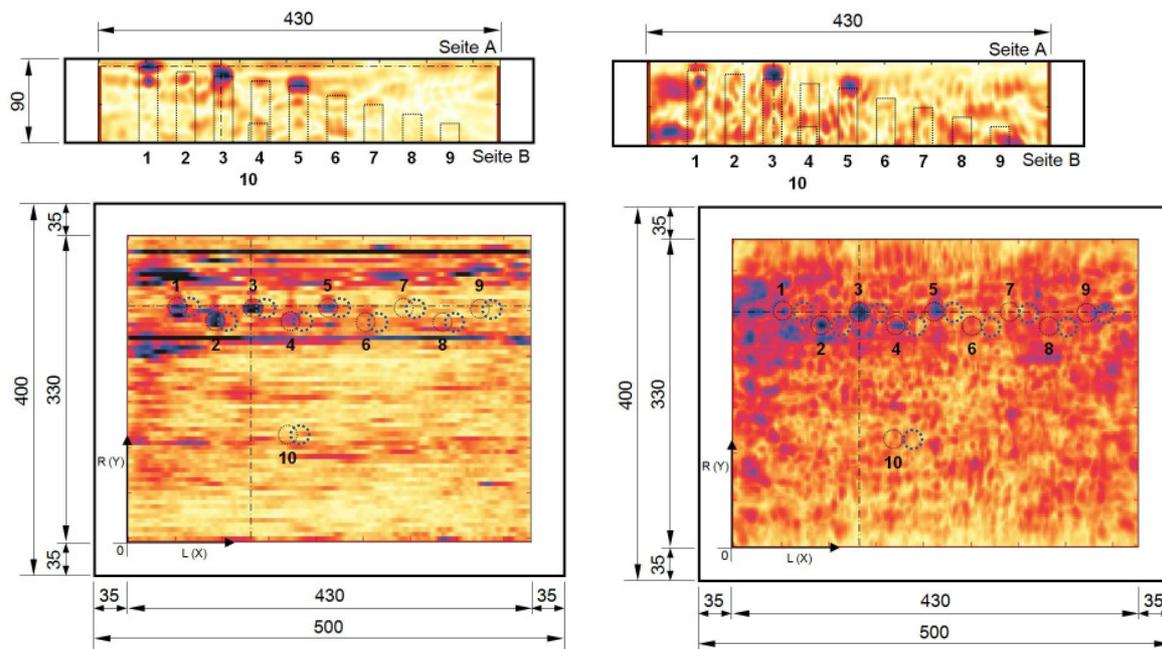


Bild 75 Fichte245, Polarisation TT, Vergleich der Rekonstruktionsrechnung mit dem Bauplan (Position der Kreisseibenreflektoren). Jeweils Überlagerung des SAFT-B-L,T-Bildes mit der Seitenansicht und der SAFT-C-Projektion mit der Draufsicht von Seite A: Links: Rekonstruktion mit isotroper Geschwindigkeitsannahme (1280 m/s) (Modell a), Rechts: Rekonstruktion mit elliptischer Geschwindigkeitsanpassung (Modell b)

Zum Vergleich der Reflektoranzeigen mit der Lage der wahren Position der Kreisseiben ist in Bild 73 die maßstabgerechte Überlagerung der Rekonstruktion mit dem Bauplan gezeigt. Links ist dafür das Ergebnis der gestapelten 2D-Rekonstruktionsrechnung (Modell a) gezeigt. Die Überlagerung der Rekonstruktion mit elliptischen Ansatz (Modell b) aus Bild 74 ist rechts dargestellt. Es werden sowohl die Draufsicht von Seite A als auch die Seitenansicht verglichen. Es ist zu erkennen, dass insbesondere die Tiefe der Kreisseibenreflektoren 1, 3 und 5 ortsgenau bezüglich der Tiefe und des Durchmessers abgebildet werden. Lediglich bei der Tiefenanzeige der Kreisscheibe 1 ($z = 10$ mm) ist in der elliptischen Rekonstruktion das erste Vielfachecho intensiver als die direkte Echoanzeige abgebildet.

Die Kreisseiben 2 und 4 sind in der gewählten Schnittachse des SAFT-B-L,T-Bildes $y = 250$ mm nicht dargestellt. Sie erscheinen deutlich in der C-Bild-Projektion.

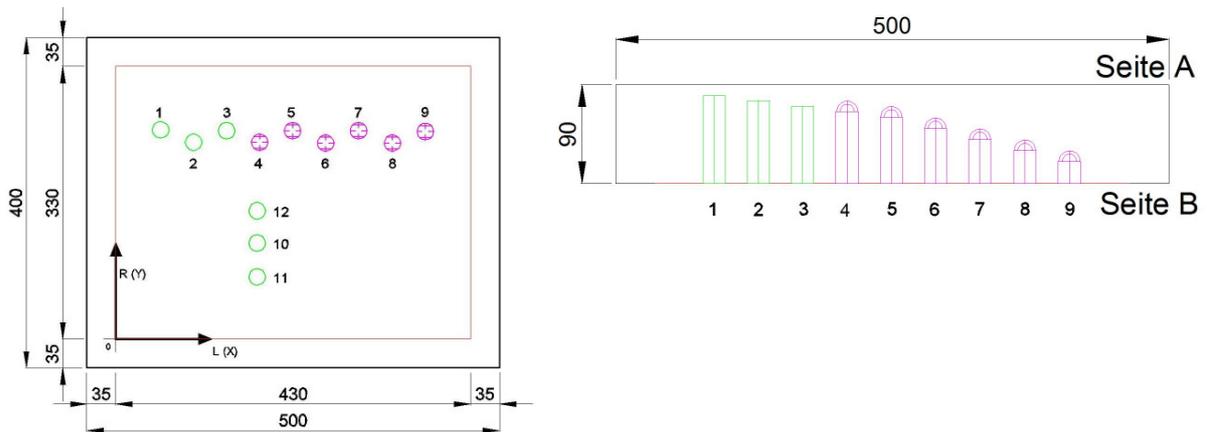
Die Kreisseiben 1 bis 5 werden also mit beiden Geschwindigkeitsmodellen ortsgenau in $L(x)$ und $R(y)$ abgebildet. Im Vergleich ist das die deutlichste Abbildung aller drei Anregungsarten.

Die Kreisseiben 6 bis 10 werden nicht abgebildet. Ab Kreisseiben 6 (Tiefe $z = 40$ mm) liegen sie unterhalb der Leimfuge bei 45 mm. Um herauszufinden, ob das ein Grund sein kann und um die Rückstreuung der Kreisseiben 1 bis 5 weiter zu untersuchen, wurde der Probekörper modifiziert.

Messungen mit modifizierten Kreisseibenreflektoren

Wie geschildert lassen sich die Kreisseibenreflektoren mit der Druckwellenanregung (Polarisation TT) bis zu einer Tiefe von 30 mm mit guter lateraler und Tiefenaufösung nachweisen. Die anderen Polarisationen und größere Tiefen funktionieren nur teilweise oder gar nicht. Um die Gründe herauszufinden, wurden die Kreisseiben im Probekörper Fichte245 teilweise modifiziert und neue hinzugefügt. Die Bohrungen für die Kreisseiben 4 bis 9 wurden zur Messfläche hin mit einer halbkugelförmigen Rundung versehen. Außerdem wurde die Bohrung 10 vertieft und mittels weiterer Flachbodenbohrungen die Kreisseiben 11 und 12 oberhalb und unterhalb der Kreisscheibe 10 eingebracht, und zwar so, dass die

Reflektorfläche von der Messseite A gesehen noch unterhalb der Leimschicht positioniert sind. Die Details sind Bild 76 zu entnehmen.



Nr.	L (X)	R (Y)	Tiefe (Material) bis Kreisscheibe (Z _k)	von Seite A bis Scheitel (Z _s)
1	54	253	10.0	
2	94	238	14.5	
3	134	252	19.6	
4	174	238	24.6	15.0
5	214	252	29.6	20.0
6	254	237	39.8	29.0
7	294	252	50.1	40.7
8	335	237	60.1	52.7
9	375	251	70.1	61.7
10	171	116	49.0	
11	171	75	19.0	
12	171	155	49.0	

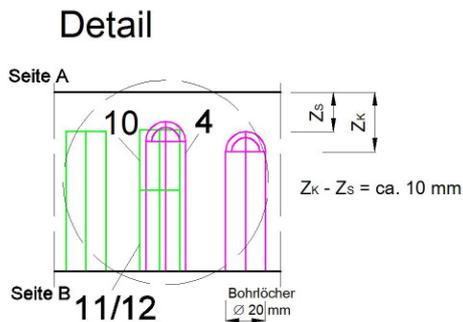


Bild 76 Modifizierte Kreisscheibenreflektoren im Probekörper Fichte245 (alle Maße in mm)
 Oben links: Ansicht der Reflektoren von der Messseite A (Grün: nicht modifizierte Bohrungen gegenüber Bild 68 , Kreisscheiben 11 und 12 neu eingebracht)
 Oben rechts: Seitenansicht; Grün: ursprüngliche Position beibehalten, rot: modifiziert mit halbkugelförmigen Rundungen
 Unten links: Detail zur Bemaßung
 Unten rechts: Tiefe der Kreisscheiben bzw. der Scheitelpunkte von der Messseite A

Die spannenden Ultraschallechomessungen am Probekörper Fichte245 erfolgten in gleicher Weise, wie für den ersten Satz von Kreisscheiben mit den Polarisationen TL, TR und TT, ebenfalls mit der 1+1-Prüfkopfmodifikation.

Modifizierte Kreisscheibenreflektoren bei Anregung mit der Polarisation TL

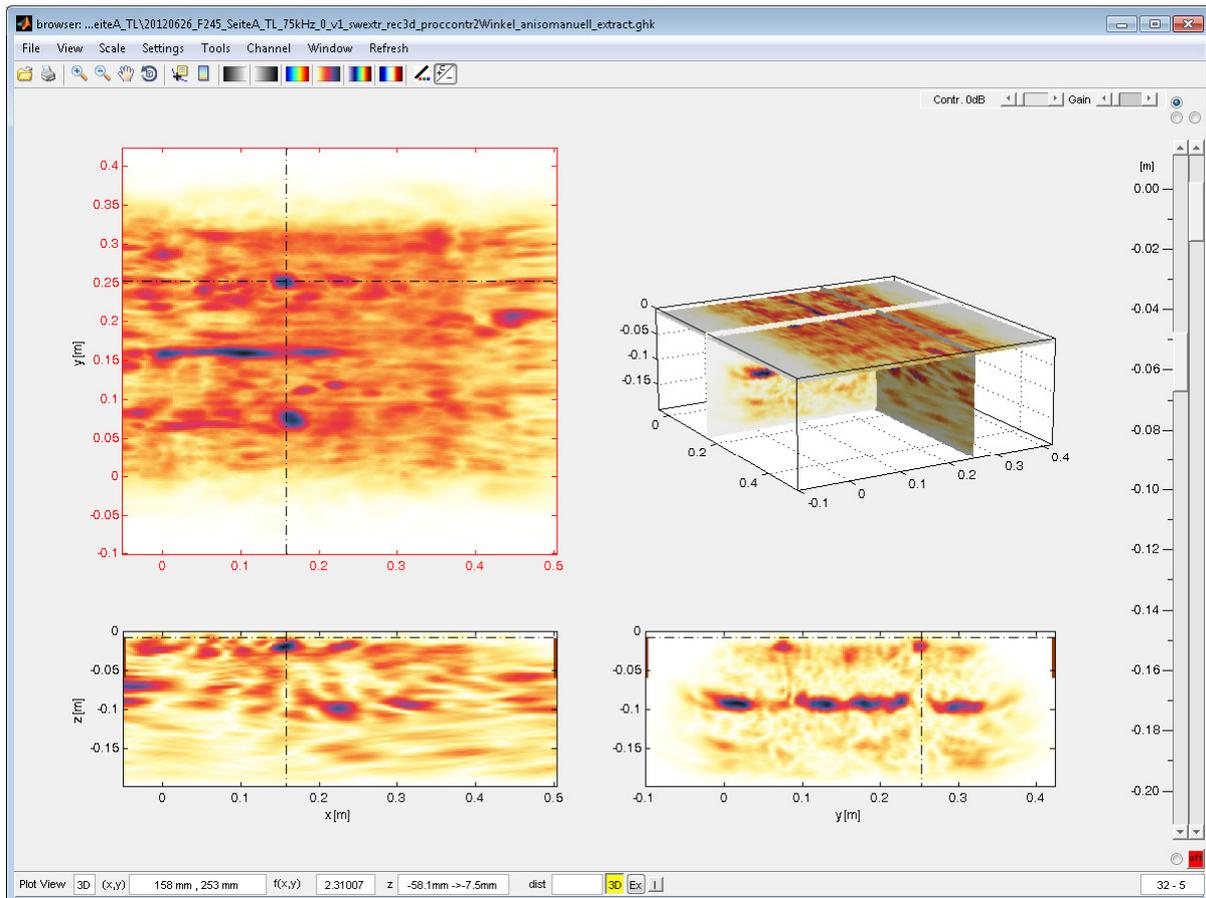


Bild 77 Fichte245 mit modifizierten Kreisscheiben, Polarisation TL, Ergebnis der 3D SAFT Rekonstruktion mit anisotropem Profil (manuell ermittelt). Projektion der oberflächennahen Reflexionen bis zur dargestellten Ebene in der Tiefe von $z=58$ mm zur Darstellung der Kreisscheiben-Reflexionen

Bild 77 zeigt das Ergebnis der anisotropen elliptischen 3D Rekonstruktionsrechnung mit manuell ermittelten Geschwindigkeiten ($c_L = 6092$ m/s) und T- und R-Richtung identisch angesetzt mit 1432 m/s). Die in allen drei Ebenen deutlich erkennbare Streuanzeige bei $x = 158$ mm / $y = 235$ mm entspricht im Bauplan lediglich in der y-Koordinate der Kreisscheibe 4, in der x-Koordinate ergibt sich eine Abweichung von 16 mm ($x = 174$ mm gemäß Bauplan Bild 76). Auch sind keine Anzeigen der benachbarten gewölbten Reflektoren 2 bis 5 ähnlicher Tiefe zu erkennen.

Dagegen stimmt der Ort der fokussierten Anzeige im SAFT-C-Bild (unterer Reflektor in Bild 78) mit der Position der neu eingebrachten Kreisscheibe 11 überein (Abweichung in x-Richtung lediglich 6 mm). In den SAFT-B-L \sim x, T \sim z- und B-R \sim y, T \sim z-Darstellungen bestätigt sich dieses Ergebnis zusätzlich auch in der Tiefenanzeige des Reflektors ($z = 20$ mm) in Übereinstimmung der tatsächlichen Tiefe von 19 mm.

Damit ergibt sich die Frage, warum dann die modifizierte Kreisscheibe 10 und die neu eingebrachte Kreisscheibe 12 in einer Tiefe von 49 mm nicht abgebildet werden.

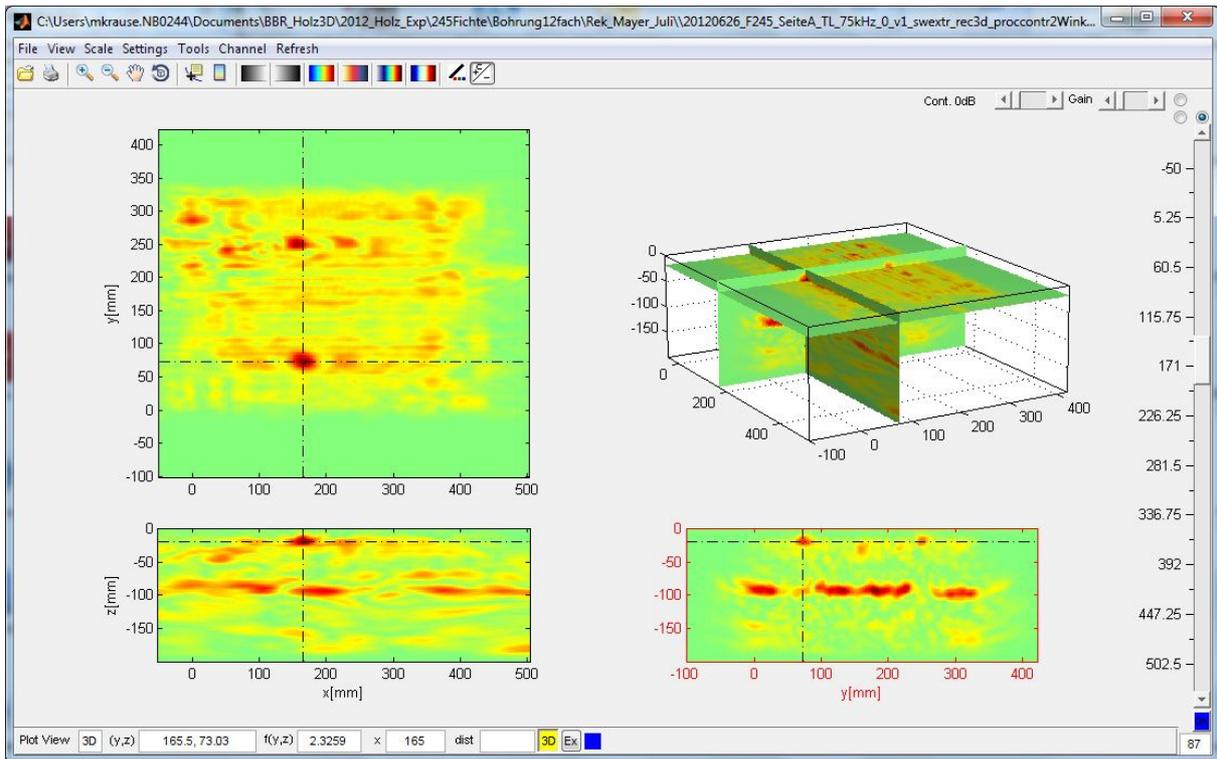


Bild 78 Fichte245 mit modifizierten Kreisscheiben, Polarisation TL, Ergebnis der SAFT Rekonstruktion mit anisotropem Profil (manuell ermittelt). Fokussierte Streuanzeige der Kreisscheibe 11

Modifizierte Kreisscheibenreflektoren bei Anregung mit der Polarisation TR

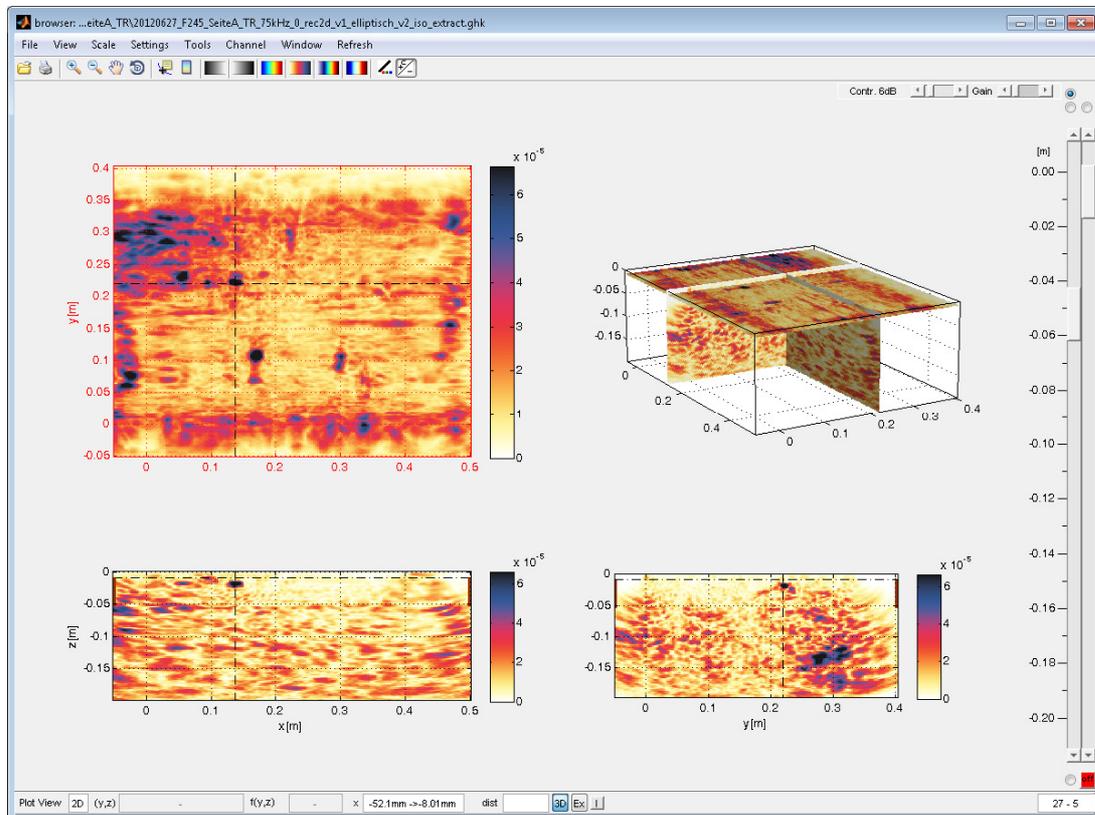


Bild 79 Fichte245 mit modifizierten Kreisscheiben, Polarisation TR, Ergebnis der 3D SAFT Rekonstruktion mit elliptischem Geschwindigkeitsprofil. Projektion des Tiefenbereiches der Kreisscheiben $z = 8$ bis 52 mm

Die Rekonstruktion der Messung mit der Polarisationsrichtung der Scherwelle parallel zur R-Achse erfolgte mit einem elliptischen Geschwindigkeitsansatz ($c_{TL} = 1370$ m/s, $c_{TR} = c_{RT} = 546$ m/s). Im der in Bild 79 dargestellten SAFT-C-Bild-Projektion sind wieder jeweils die Anzeigen aus dem Tiefenbereich der Kreisscheiben (z : 8 bis 52 mm) aufsummiert.

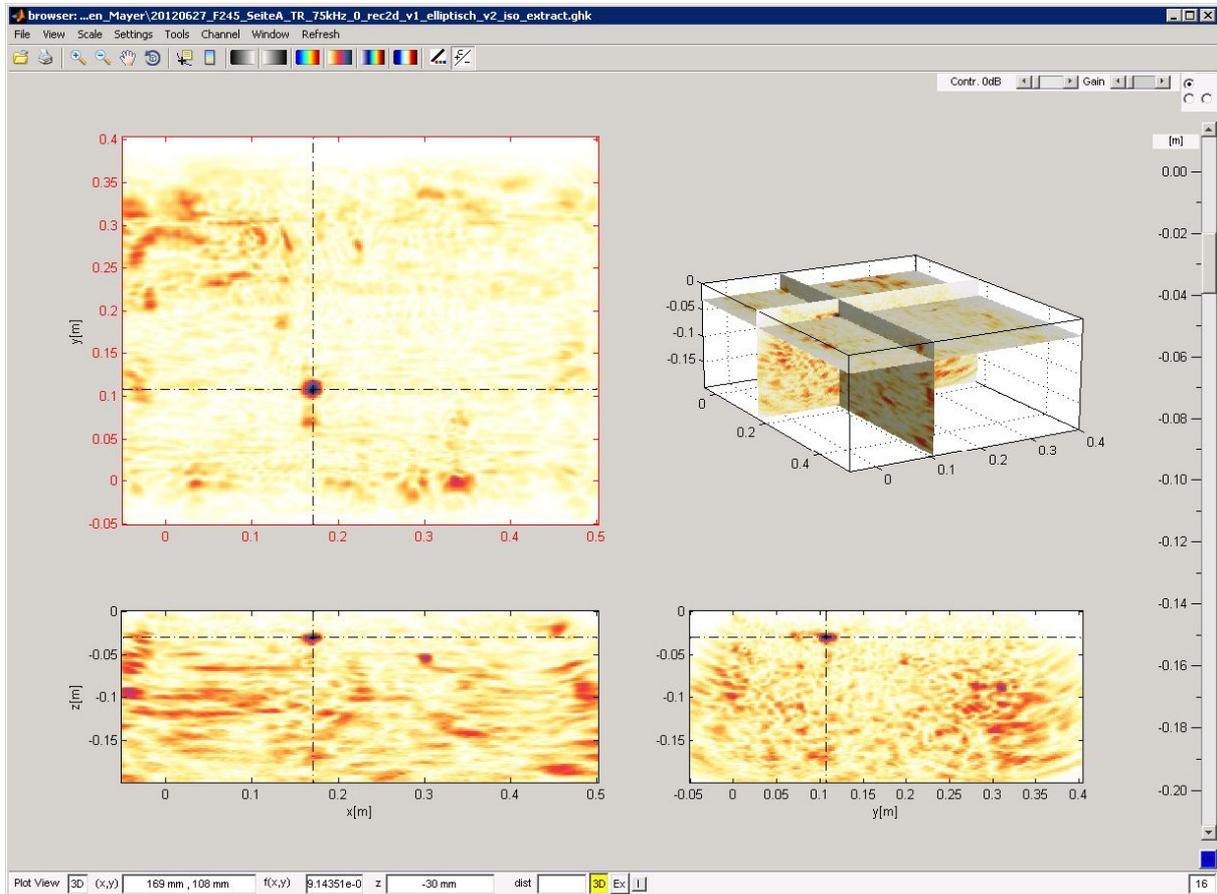


Bild 80 Fichte245 mit modifizierten Kreisscheiben, Polarisation TR, Ergebnis der 3D FT-SAFT Rekonstruktion mit elliptischem Geschwindigkeitsprofil. Fokussierte Anzeige der Kreisscheibe 10

Für die im SAFT-C-Bild in Bild 79 erkennbare Anzeige bei $x/y = 169 / 108$ mm bestätigt sich eine Übereinstimmung mit der Kreisscheibe 10, wie per Fadenkreuz in Bild 80 genauer gezeigt ist. Die Tiefenanzeige weicht allerdings mit $z = 30$ mm deutlich von der wahren Tiefe (49 mm) ab. Dagegen ergibt der Vergleich der relativ schwachen Anzeige bei $y = 70$ mm eine Übereinstimmung mit der Kreisscheibe 11 (wahre Tiefe 19 mm). Die Kreisscheibe 12 mit einer wahren Tiefe von ebenfalls 49 mm wird nicht angezeigt.

Modifizierte Kreisscheibenreflektoren bei Anregung mit der Polarisation TT

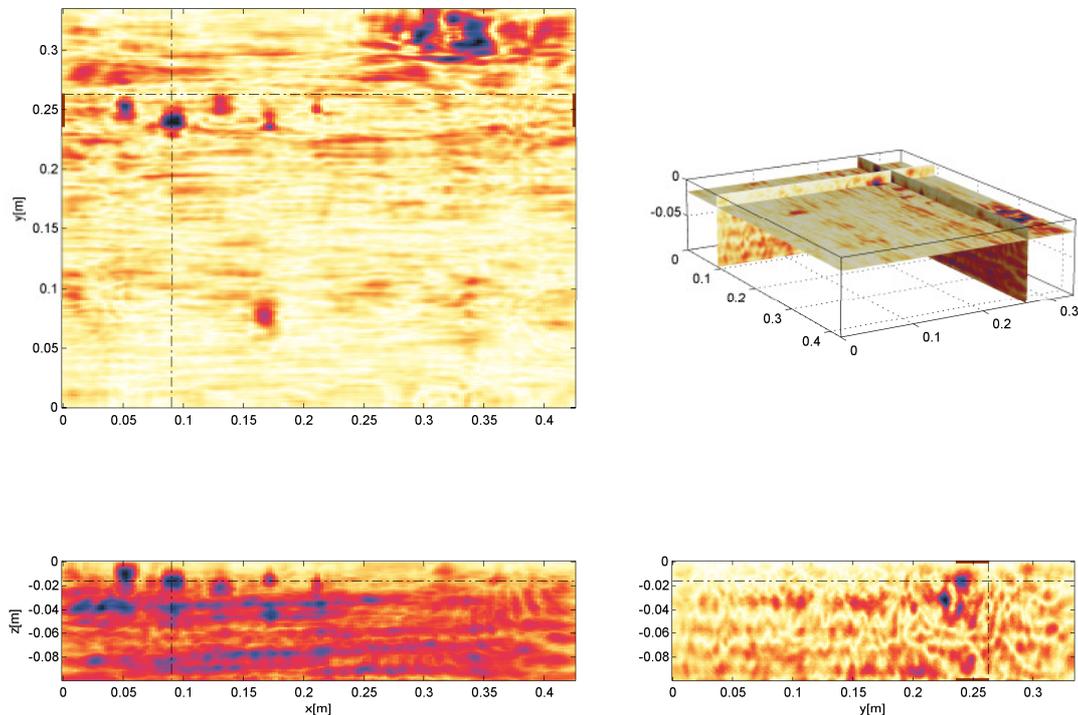


Bild 81 Fichte245 mit modifizierten Kreisscheiben, Polarisation TT, Ergebnis der 3D SAFT Rekonstruktion mit elliptischem Geschwindigkeitsprofil und 2D Rekonstruktion. Projektion des y-Bereiches der Kreisscheiben

Eine Übersicht des Ergebnisses zeigt Bild 81. Im SAFT-B-x,z-Bild ist nur der Bereich dargestellt, in dem die Kreisscheiben liegen. Man erkennt deutlich die Kreisscheiben 1 bis 5. Die Tiefenanzeigen der Kreisscheiben 4 und 5 sind entsprechend der aufgebrachtten Wölbung gegenüber den Ergebnissen aus Bild 73 oben verschoben.

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.

Zum Vergleich ist in Bild 82 der y-Bereich unterhalb des Bereiches der Kreisscheibenreflexionen zusätzlich dargestellt. Der linienförmige Reflex bestätigt sich.

In Bild 81 und Bild 82 ist im SAFT C-Bild zusätzlich eine flächige Reflexion zu sehen. Sie liegt mit $z = 40$ mm im Tiefenbereich des Wechsels zwischen den beiden Fichtenholzschichten in der Mitte des Probekörpers (halbe Dicke 45 mm). Mögliche Ursachen dafür sind:

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

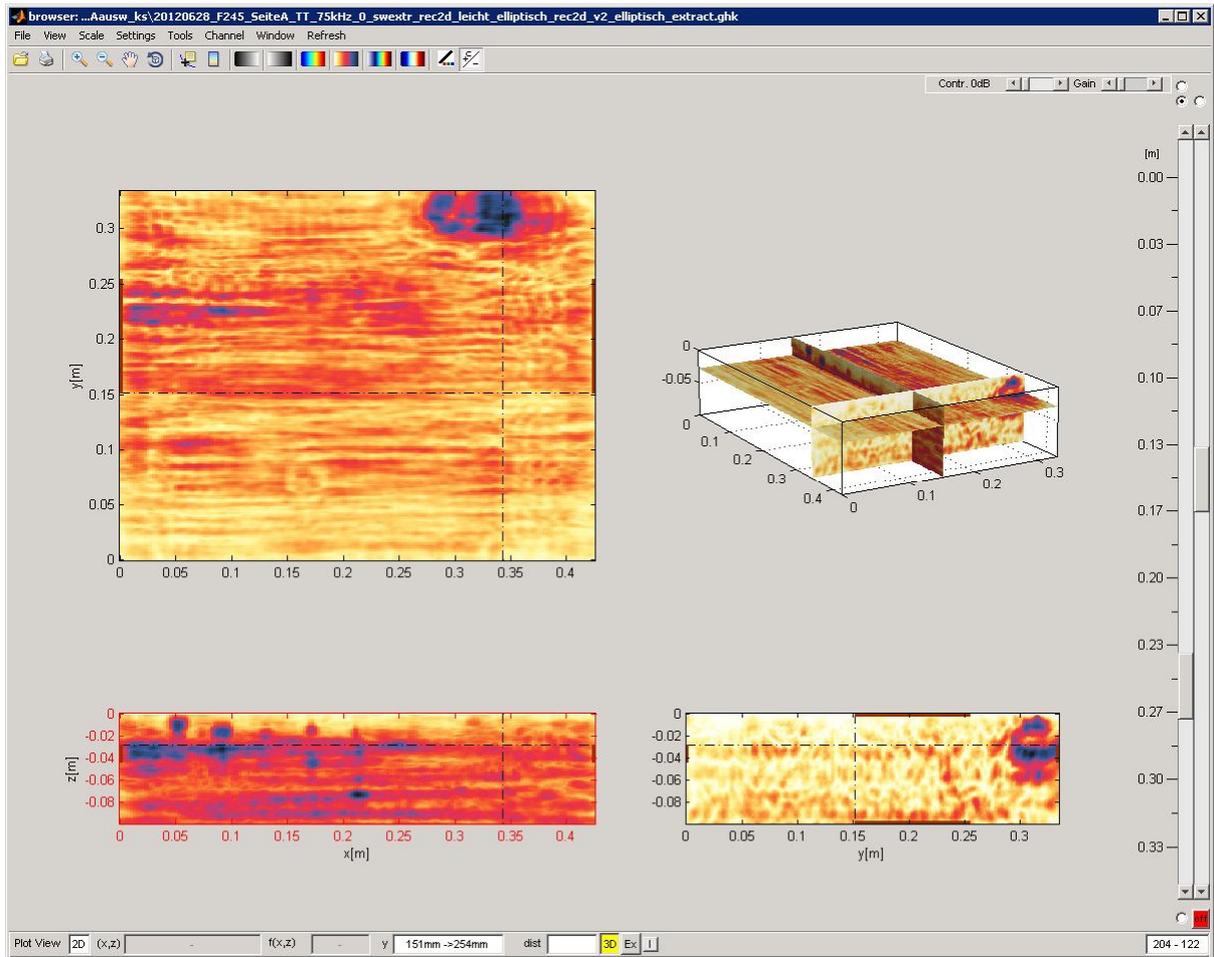


Bild 82 Fichte245 mit modifizierten Kreisscheiben, Polarisation TT, Ergebnis der SAFT Rekonstruktion mit elliptischem Geschwindigkeitsprofil und 2D Rekonstruktion. Projektion des y-Bereiches einer Linienförmigen Reflexion um $y = 40$ mm

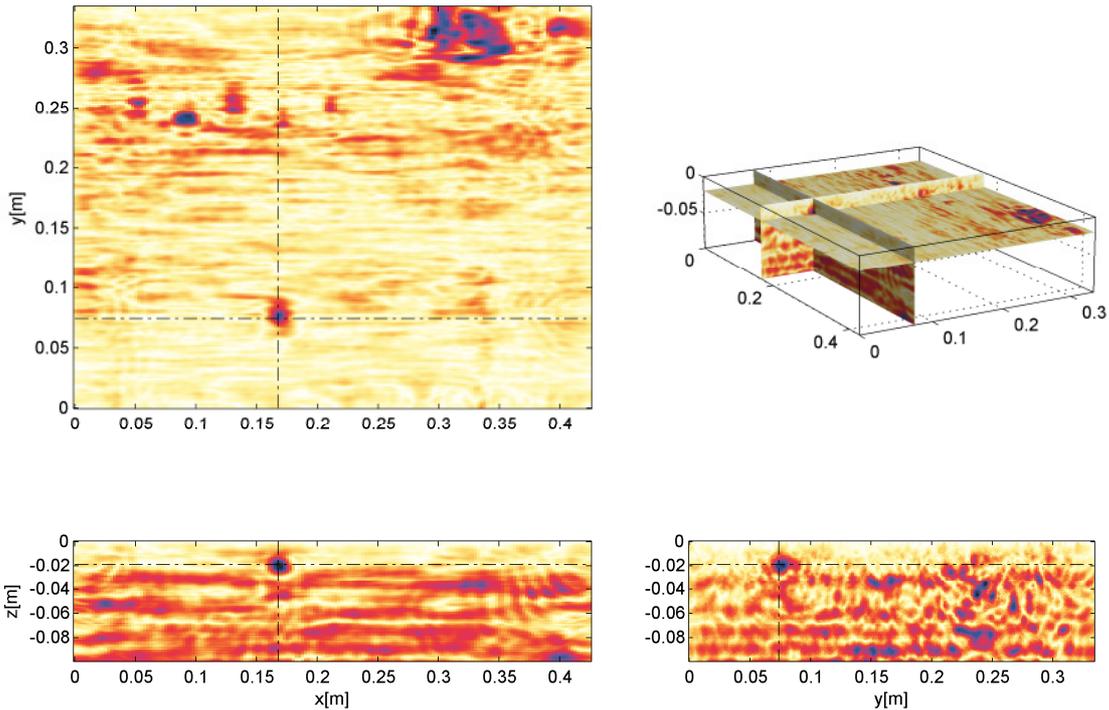


Bild 83 Fichte245 mit modifizierten Kreisscheiben, Polarisation TT, Ergebnis der 3D SAFT Rekonstruktion mit elliptischem Geschwindigkeitsprofil und 2D Rekonstruktion. Darstellung der ortsgenauen Abbildung von Kreisscheibe 11

Von den unteren Kreisscheiben ist mit den Druckwellen (TT-Polarisation) nur die Kreisscheibe 11 gut abgebildet (Bild 83). Die Ortskoordinaten und die Tiefenanzeige ($z = 20$ mm im Vergleich zur wahren Tiefe von 19 mm) stimmen sehr gut überein. Die tieferen Kreisscheiben 10 und 12 unterhalb der Leimung werden nicht angezeigt.

Fazit der Messungen am Probekörper F245

Der Nachweis der Ultraschallabbildung von Kreisscheibenreflektoren des Probekörpers Fichte245 orientiert sich an einer in anderen Bereichen der Ultraschalltechnik üblichen Vorgehensweise, nämlich bekannte Streuer in unterschiedlichen Tiefen unter verschiedenen Randbedingungen abzubilden und aus dem Vergleich mit der bekannten Position Rückschlüsse auf Auflösung, Abbildungsgenauigkeit und Grenzen der jeweiligen Verfahrensvariante quantitativ anzugeben. Im Fall der Verfahrensentwicklung für Holzbauteile ist dabei das erste Ziel, herauszufinden, mit welcher Anregungskonstellation die Streuer überhaupt abgebildet werden und welche Genauigkeit mit den am jeweiligen Probekörper ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeiten zu erreichen ist. Dabei steht der Vergleich mit den bekannten Streuern im Vordergrund. Die Frage, ob diese die Bildanzeigen auch von zusätzlichen Anzeigen – verursacht z. B. durch Risse, Materialinhomogenitäten oder andere Effekten – im Blindversuch unterscheidbar sind, ist hier noch nicht das Ziel und bleibt einem weiteren Entwicklungsschritt vorbehalten.

Mit der Polarisation TL und elliptischer Geschwindigkeitsanpassung in L-Richtung wird keine systematische Abbildung erreicht, lediglich in einzelne Kreisscheiben werden abgebildet. Für die Rekonstruktion wird die an der Oberfläche angeregte qP-Welle berücksichtigt, und zwar anhand der manuell ermittelten Geschwindigkeit in Form eines Ellipsoids im Gruppengeschwindigkeitsdiagramm. Mit dieser Welle wird in der verwendeten S/E-Anordnung eine Abbildung von Streuern erreicht, aber wegen des schrägen Verlaufes nicht das Rückwandecho angezeigt. Letzteres wäre hier nur mit einer multistatischen Messtechnik zu erreichen.

Bei der TR-Anregung in R-Richtung tritt der Effekt auf, dass die Anzeigen in dieser Richtung „verschmiert“ sind. Für flache Kreisscheiben (bis zu einer Tiefe von 20 mm) wird in L-Richtung zwar eine deutliche Reflektoranzeige erreicht, allerdings in den meisten Fällen am falschen Ort.

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 Fichte245 in einer Tiefe von 39 mm befindet. Damit liegt dieser Reflektor oberhalb der Leimfuge. Eine saubere Abbildung scheint also entweder durch die Leimung oder dem Wechsel der Jahresringneigung, also der Änderung der Symmetrie, verhindert zu werden. Eine gezielte Vertiefung weiterer Sacklochbohrungen, also ein kleinerer Abstand zur Messfläche, kann hier zur Klärung beitragen. Da sich im Laufe der Zeit Risse im Probekörper gebildet haben, kann aber auch ein solcher Störeinfluss nicht ausgeschlossen werden.

Eine systematische Studie von weiteren vertieften Bohrungen wurde wegen zusätzlich auftretender Risse im PK Fichte245 nicht unternommen.

Auch wegen des störenden Einflusses der an den Rändern reflektierten Oberflächenwellen wurde deshalb ein neuer, wesentlich größerer Probenkörper konzipiert und gefertigt (siehe Kapitel 6.1). Die entsprechenden Untersuchungen ließen sich aus Kapazitätsgründen nicht mehr im laufenden Vorhaben angehe.

Messungen mit dem Lineararray

Der Fichteholzprobekörper F245 wurde auch mit dem Lineararray (Beschreibung s. auch Kapitel 3.1.3) untersucht. Analog der Messungen mit dem Scanner wurden Messungen ohne Fehlstellen, mit 9 Kreisscheiben und mit den tiefer gebohrten 12 Kreisscheiben vorgenommen.

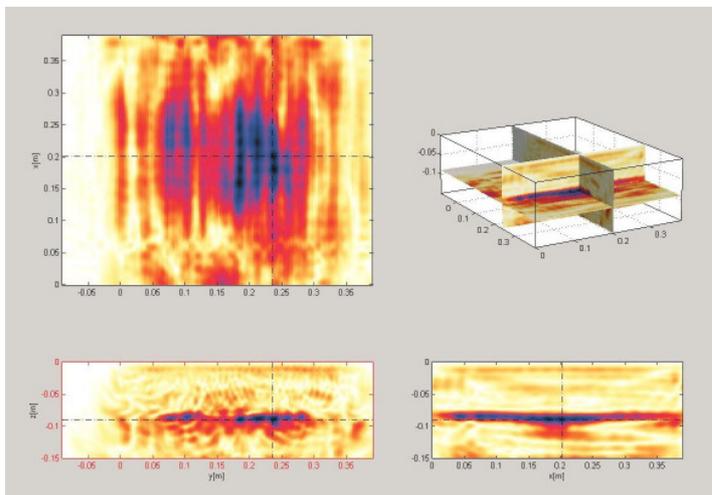


Bild 84 Fichte245 mit später modifizierten Kreisscheiben, Messung mit dem Lineararray, Ergebnis der 3D SAFT Rekonstruktion. Darstellung der Referenzmessung des Probekörpers ohne Bohrungen.

Bei der Referenzmessung (s. Bild 84) ist die Rückwand des Probekörpers gut bei der korrekten Dicke von 9 cm mit der SAFT-Rekonstruktion darstellbar.

Im Folgenden (s. Bild 85) sind die Darstellungen der $T \sim z/R \sim y$ -Ebene untereinander gezeigt, um den Unterschiede zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten besser vergleichen zu können.

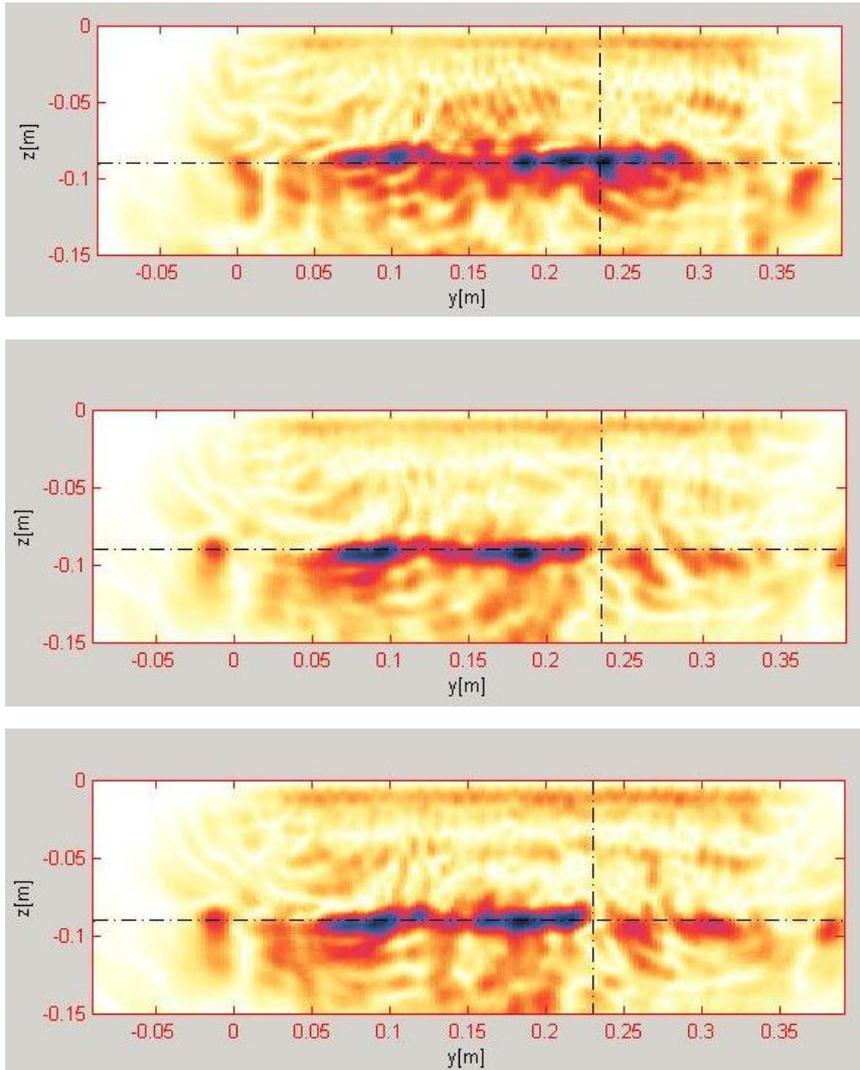


Bild 85 Fichte245 mit modifizierten Kreisscheiben, Messung mit dem Linerarray, Ergebnis der 3D SAFT Rekonstruktion.
 oben: Darstellung der Referenzmessung des Probekörpers ohne Bohrungen
 Mitte: Darstellung der Messungen an dem Probekörper mit 9 Bohrungen
 unten: Darstellung der Messungen an dem Probekörper mit 12 Bohrungen

Wie in Bild 85 zu sehen ist, sind die eingebrachten Kreisscheiben weder im Fall von 9 Bohrungen noch von 12 Bohrungen darstellbar. Bei den Messungen mit dem Linerarray kann eine Abschätzung des Rückwandechos festgestellt werden. Diese Abschätzung tritt in beiden Fällen ab $y \cong 0,23$ m auf.

7 Ergebnisse an realen Bauteilen

7.1 Brettschichtholzträger (Fichtenholz)

Die TU München (vermittelt durch Prof. Kreuzinger) stellte einen Brettschichtholz binder (BSH) aus Fichtenholz für Versuche zur Verfügung. Der Transport zur BAM erfolgte im Herbst 2011. Zunächst wurden Ultraschallmessungen an den daraus zugeschnittenen Probekörpern BSH1 und BSH2 durchgeführt.



Bild 86 Brettschichtholz binder-Probekörper von der TU München zur Verfügung gestellt

Die 2x2 m großen Teile der Brettschichtholz binder wurden in kleinere Teile zerteilt, damit diese für die Messtechnik besser einsetzbar waren. Die gelieferten Brettschicht binder haben eine Dicke von 22 cm. Da an einigen Stellen der Probekörper schon erhebliche Schädigungen durch Risse vorlagen, waren diese bei Transport und Bearbeitung nicht mehr stabil, so dass sie in etwas kleinere Teile (z.B. 0,9 x 2,1 m) geteilt wurden.

Das Teilstück BSH1 ist in Bild 87 dargestellt. An diesem Probekörper wurden sowohl Messungen mit dem scannenden System mit dem 1x1-Prüfkopf als auch Messungen mit dem Linear-Array durchgeführt.

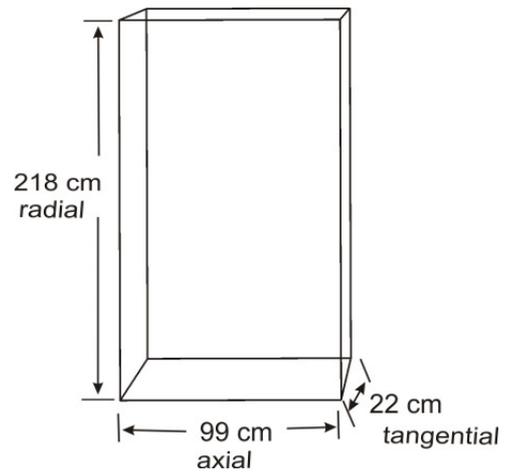


Bild 87 Probekörper BSH1, Brettschichtholz binder

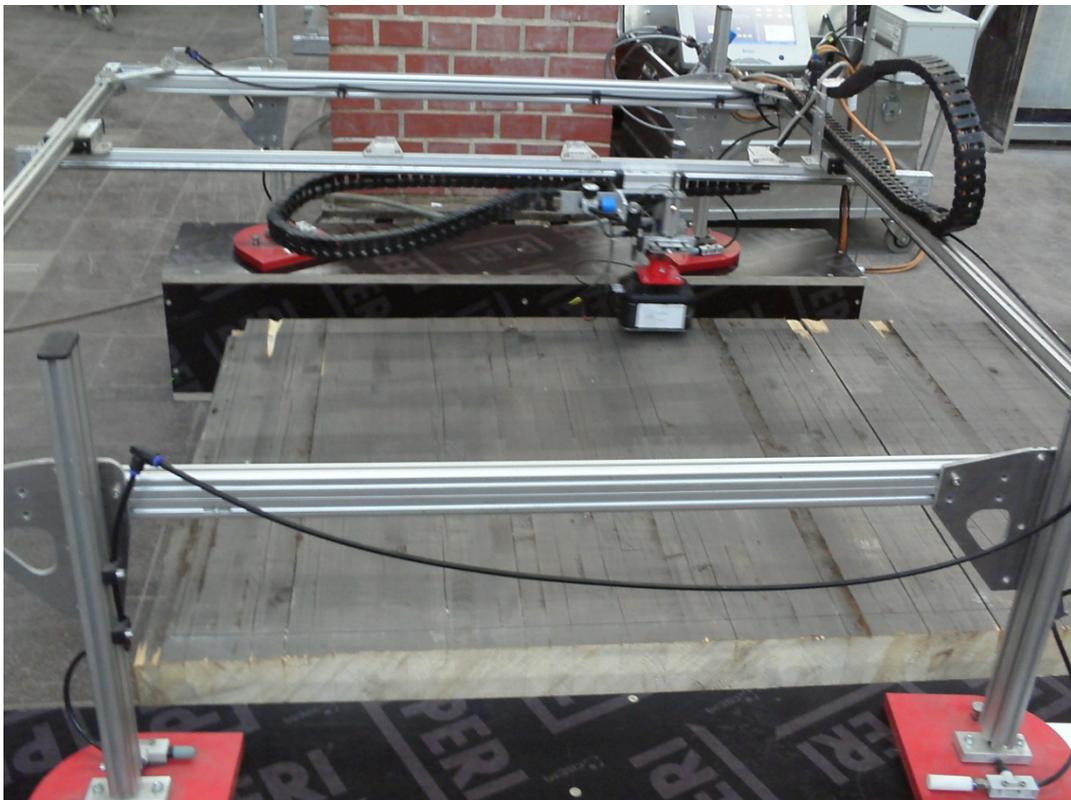


Bild 88 Scannermessung am Brettschichtholz binder BSH1, Scherwellen mit Polarisation in Faserrichtung (TL)

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 (s. Bild 89). Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Schallausbreitung auf geführte Wellen entlang der Lamellen des Brettschichtholzes beschränkt ist.

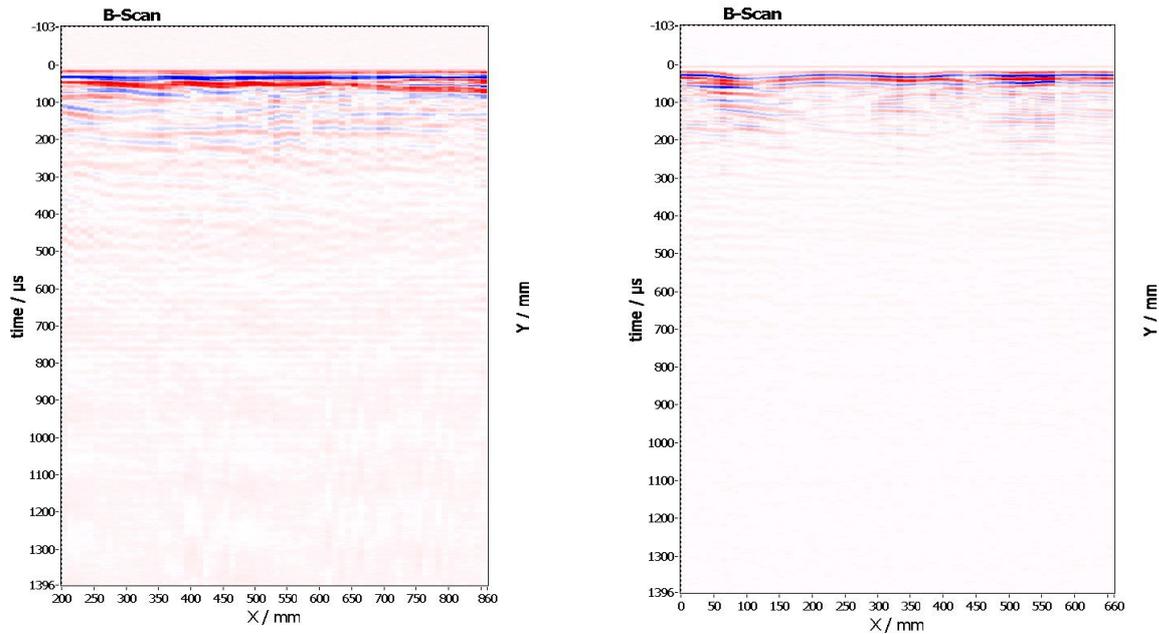


Bild 89 Darstellung des B-Bildes der Messungen mit Transversalwellen (Durchschallung T, Polarisation L) an dem Brettschichtbinder
links bei einer Frequenz von 35 kHz
rechts bei einer Frequenz von 75 kHz

Die Rekonstruktion mittels SAFT der mit dem Scanner erhaltenen Messdaten wurde 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.

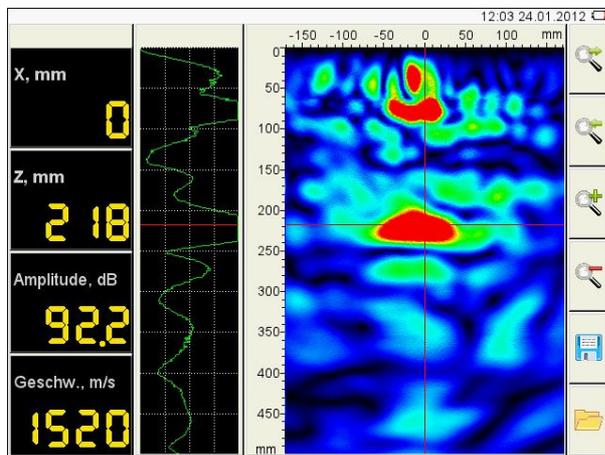


Bild 90 Messungen mit dem Linear-Array bei 25 KHz an dem Brettschichtbinder (Einzelmessung)

Es wurden zusätzlich Messungen mit dem Linear-Array durchgeführt. Bei den Messungen bei einer Anregungsfrequenz von 25 kHz lässt sich mit der im Gerät integrierten kommerziellen Abbildungssoftware mit einer Kalibrierung der Geschwindigkeit auf 1520 m/s wahrscheinlich das Rückwandecho abbilden (s. Bild 90).

Auf Basis dieses Versuches wurde ein kombinierter Datensatz aus 187 Positionen des Linearen Array aufgenommen (17 Richtung L * 11 Richtung R, Bild 91).

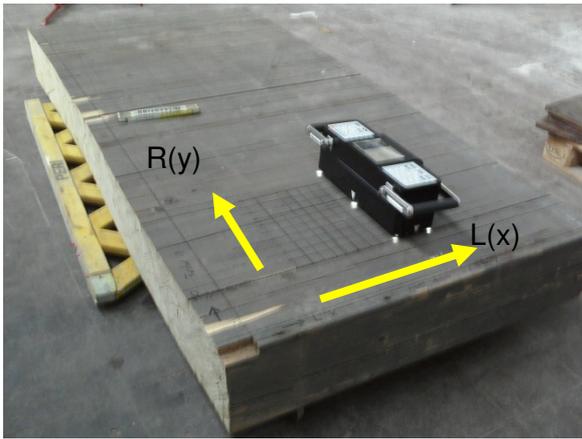


Bild 91 Messungen mit dem Linear-Array bei 25 KHz an dem Brettschichtbinder BSH1 (Messfeld 17 * 11 Positionen)

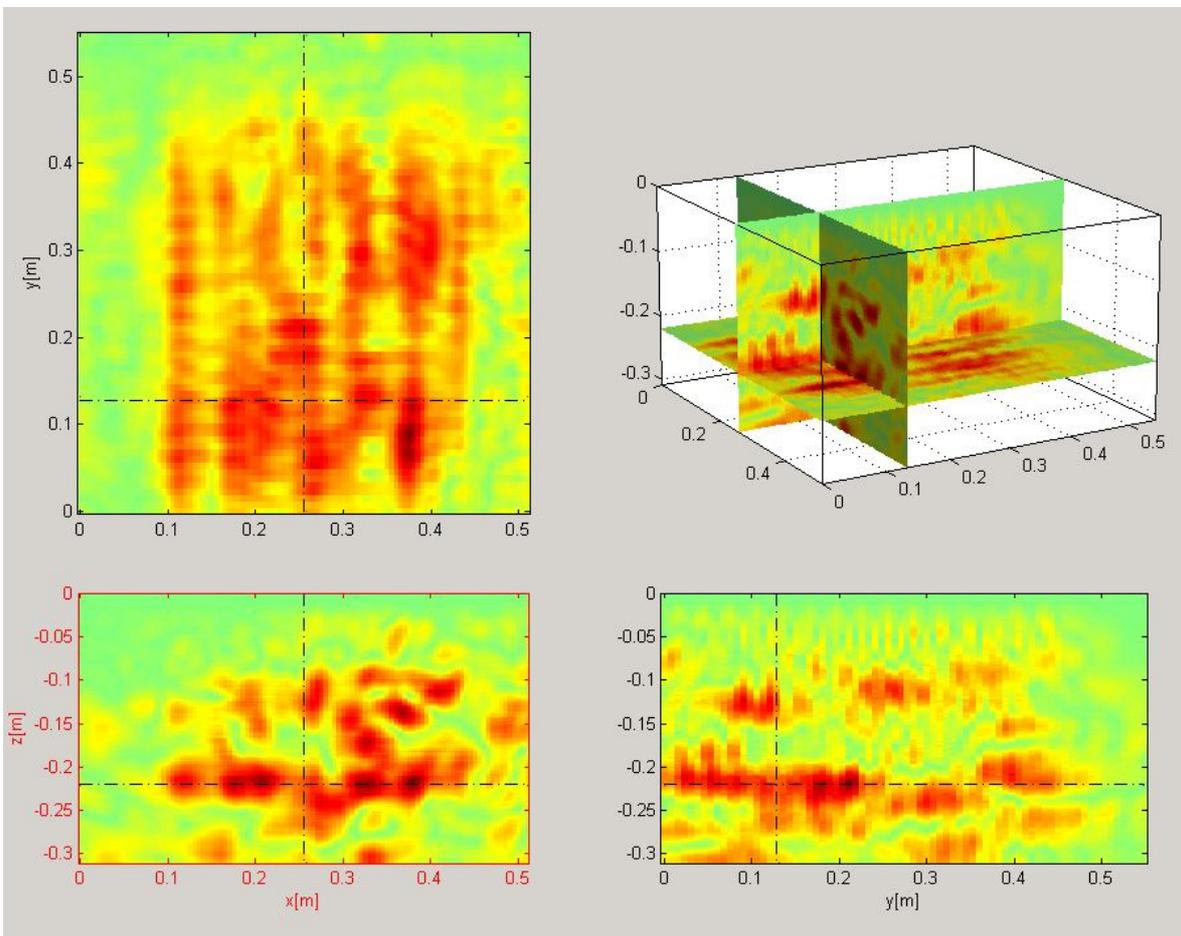


Bild 92 Auswertung der Linear-Array Messung am BSH 1 mit 3D-SAFT

In der Auswertung des kombinierten Datensatzes mit 3D-SAFT mit elliptischer Geschwindigkeitsanpassung (Bild 92) ist andeutungsweise das Rückwandecko zu erkennen. Die Qualität der Abbildung und die zahlreichen Rückstreuungen aus dem Inneren des Volumens ermöglichen aber keine eindeutige Zuordnung von Streuern. Umfangreiche Versuche an einem weiteren großen Teil des Brettschichtbinders (BSH4) zeigten ebenfalls keinen Bereich, der sich für das Einbringen künstlicher Reflektoren zu Testzwecken eignen würde. Es ist also festzuhalten, dass der aktuelle Stand der Auswertemethoden noch nicht

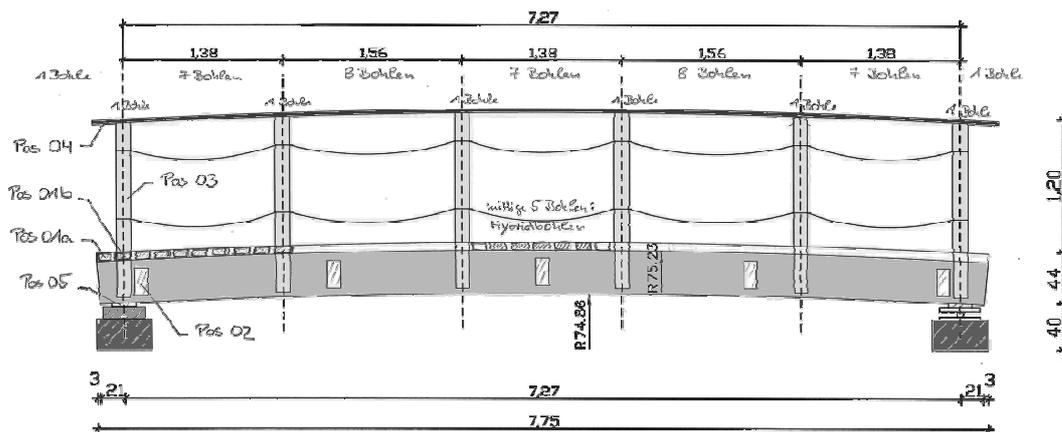
ausreicht, um an einem Brettschichtholzträger dieser Bauweise verwertbare Ergebnisse zu erzielen

Aus diesen Gründen wurden die systematischen Versuche zur Abbildung von künstlichen Reflektoren an geleimten Probekörpern aus Fichtenholz weitergeführt (Kapitel 6.4).

7.2 Anwendung an Bauwerken

7.2.1 Fußgängerbrücke Fabeckstraße

Als weiterer Anwendungstest für die bildgebenden Ultraschallechoverfahren wurde eine Fußgängerbrücke gewählt, die im Rahmen eines Forschungsvorhabens auf dem Gelände der BAM errichtet worden war (Pilotbrücke). Dabei handelt es sich um ein Hochleistungstragwerk aus Kunstharzpressholz mit dazwischen eingebrachtem Brettschichtholz aus Sibirischer Lärche. Die Träger haben eine Breite von 20 cm bei einer Höhe von 34 cm, die Länge der Brücke beträgt 7,75 m. Bei dem in BAM 8.6 *Optische und faseroptische Verfahren* bearbeiteten Projekt unter Beteiligung eines Forschungsinstitutes und eines Herstellers geht es um die Tragfähigkeit und Dauerüberwachung einer solchen Brücke mit Faser Bragg Gittern auf der Basis von Lichtwellenleitern. Einige Details der Konstruktion sind Bild 93 zu entnehmen, eine fotografische Ansicht vermitteln Bild 94 und Bild 96. Die Dicke der 10 Brettschichtholz-Lamellen beträgt jeweils 28 mm, die des Kunstharz-Pressholzes 20 mm.



Trägerquerschnitt

Unterer Bereich des Trägerquerschnitts

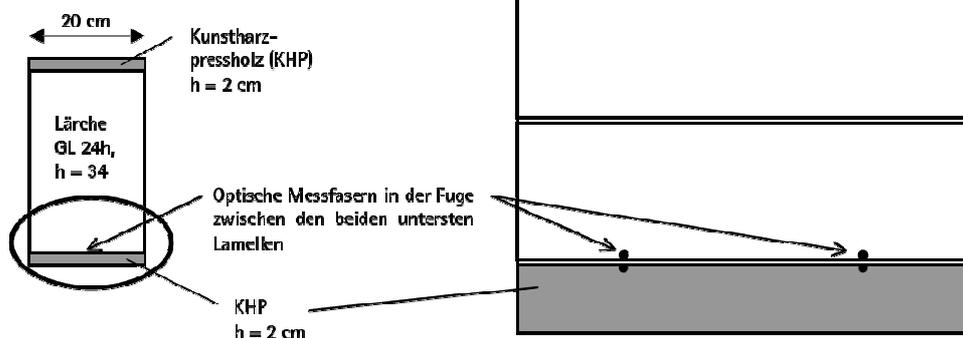


Bild 93 Fußgängerbrücke Fabeckstraße: Hochleistungsholztragwerk (HHT) aus Kunstharzpressholz (KHP) mit innen liegendem Brettschichtholz aus sibirischer Lärche. Oben: Seitenansicht, Unten: Details zum Träger. (Mit freundlicher Genehmigung von BAM 8.6 und IAFB)



Bild 94 Fußgängerbrücke Fabeckstraße (Seitenansicht)



Bild 95 Messfeld Ost 3, 2. entspricht im Bild links dem 2. Feld von links.



Bild 96 Fußgängerbrücke Fabeckstraße. Links: Frontansicht der Brücke von Nord, Mitte: linker Träger (Ost), Ansicht von Nord (wie links), mit Koordinatenachsen für die 3D-Messung, Rechts: linker Träger (Ost), Ansicht Süd mit entsprechenden Koordinaten

Für die Testmessungen wurde das mittlere Feld der Ostseite gewählt (Messfeld Ost3, Bild 64). Ziel war die Anwendung der im Laufe des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse über das Ultraschallechoverfahren an einem realen Bauwerk. Es sollten – im Sinne einer Qualitätssicherung – der Zustand des Tragwerks aus der Gleichmäßigkeit des Rückwandechos und eventuell vorhandene Fehlstellen ermittelt werden.

Der erste Schritt besteht, mit der bisher üblichen Prüfmethode, in einer Handmessung mit dem Ultraschall-Handgerät A1220 in der Polarisation TL (Schallrichtung T mit der Polarisation der Scherwellen in Faserrichtung). Dies entspricht der verbreiteten Anwendung des Gerätes für Brettschichtholz. Das Ergebnis einer Messlinie in Bild 97 zeigt ein deutliches Rückwandecho bei einer Laufzeit von 321 μ s, woraus sich aus der bekannten Bauteildicke (20 cm) eine Ultraschallgeschwindigkeit $C_{TL} = 1240$ m/s ergibt. Zusätzlich zeigt das B-Bild reflektierende Bereiche zwischen $x = 300 \dots 600$ mm und $800 \dots 1000$ mm im Bereich um 160 μ s an, was einer Tiefe von etwa 100 mm entspricht. Die gleichzeitige Abbildung von Rückwand- und Zwischenecho deuten auf eine kleinere Breite als die Sende- bzw. Empfangskopfbreite (40 mm) in $y \sim R$ hin.

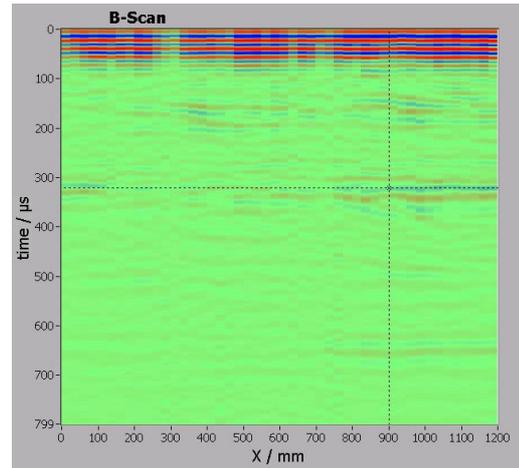
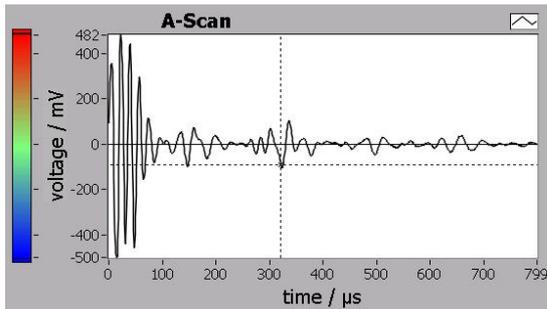


Bild 97 Ultraschallechoprüfung der Fußgängerbrücke Fabeckstraße mit A1220 per Handmessung. Links oben: Foto des Messbereiches. Darunter: A-Bild (Ultraschall-Zeitkurve) bei $x = 900$ mm. Rechts: Ultraschall B-Bild längs der Messachse

Fußgängerbrücke Fabeckstraße, Scannermessungen mit Polarisation in Faserrichtung (TL)



Bild 98 Montage des Baustellenscanners an der Fußgängerbrücke



Bild 99 Betrieb des Baustellenscanners mit A1220-Interface

In diesem Abschnitt sind die scannenden Messungen in TL Polarisation dargestellt. Sie erfolgten gemäß der im Laufe des Vorhabens etablierten Messung mit 1+1-Prüfköpfen mit einem Baustellenscanner (Bild 99). Dabei wird, im Unterschied zu den Messungen in der Prüfhalle, der Baustellen-Saugscanner (Typ BAM 8.2-4.1) verwendet, bei dem der Sendepuls und die Datenaufnahme über das A1220-Interface erfolgen (Bild 98, Bild 99). Die Übergabe der Messeinstellungen wie der Messfeldabmaße und Schrittweite erfolgt dabei standardisiert an das Auswerteprogramm. Bild 100 zeigt das Koordinatensystem des Messfeldes Ost3 mit den Bezugspunkten der durchgeführten Messungen (Linienmessungen A1220, Scannermessung, Messung mit Linear Array).

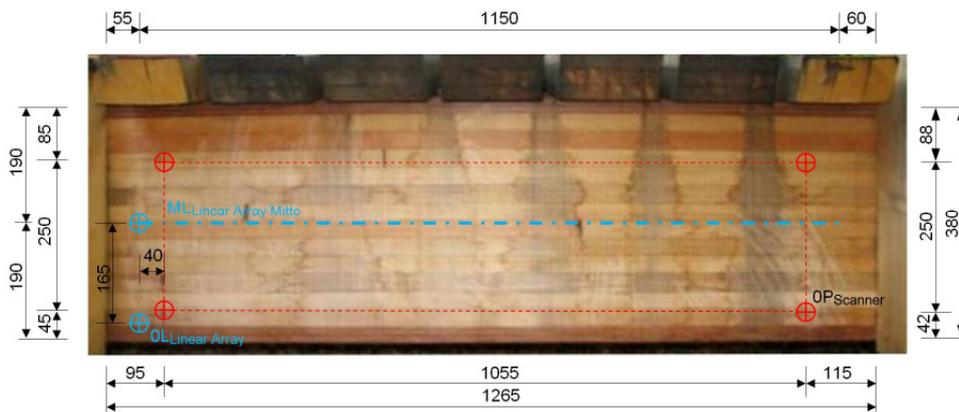


Bild 100 Koordinaten für das Messfeld Ost3. Rot: Scanner-Messfeld, Koordinatenursprung rechts unten, blau: Messlinie Linear Array, Koordinatenursprung links unten

Bild 101 zeigt zunächst ein Beispiel aus dem mit dem Scanner aufgenommenen Zeitkurven in TL-Polarisation (mit dem Prüfkopf 1+1). Die Analyse des Datensatzes zeigt neben der Rückwand flächig ausgedehnte reflektierende Bereiche, von denen einer im Zeit-C-Bild bei $t = 168 \mu\text{s}$ zu erkennen ist (Bild 101 unten). Das entspricht bei der per Rückwandecho ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeit der TL-Welle einer Tiefe von 106 mm. Die am Reflexionsmaximum dargestellten B-Bilder zeigen in $R \sim y$ -Richtung eine hyperbolische Krümmung, was auf einen kleinen Streudurchmesser hindeutet, während in $L \sim x$ -Richtung die Ausdehnung des Reflektors deutlich wird. Die Breite des Reflektors kann im $C(x,y)$ -Bild abgelesen werden. Unterhalb der Reflexionsanzeige bei $171 \mu\text{s}$ ist sowohl im $B(y,t)$ - und im $B(x,t)$ -Bild eine um ca. $30 \mu\text{s}$ versetzte parallele Reflexionslinie zu erkennen. Das ist insbesondere zwischen $x = 700 \text{ mm}$ bis 900 mm der Fall. Das deutet darauf hin, dass der Streuer nicht total reflektiert, sondern der Ultraschallimpuls teilweise eindringt oder mehrfach reflektiert wird.

In beiden B-Bildern ist das Rückwandecho bei $321 \mu\text{s}$ deutlich zu erkennen, es ist folgerichtig unterhalb der Streuer teilweise abgeschattet. Es werden zusätzlich das erste und andeutungsweise auch das zweite Vielfache des Rückwandechos angezeigt. Im $B(x,t)$ -Bild sind zusätzlich verschiedene Oberflächen- und Kantenreflexionen zu erkennen. Diese erscheinen im $B(y,t)$ -Bild erwartungsgemäß als Geraden.

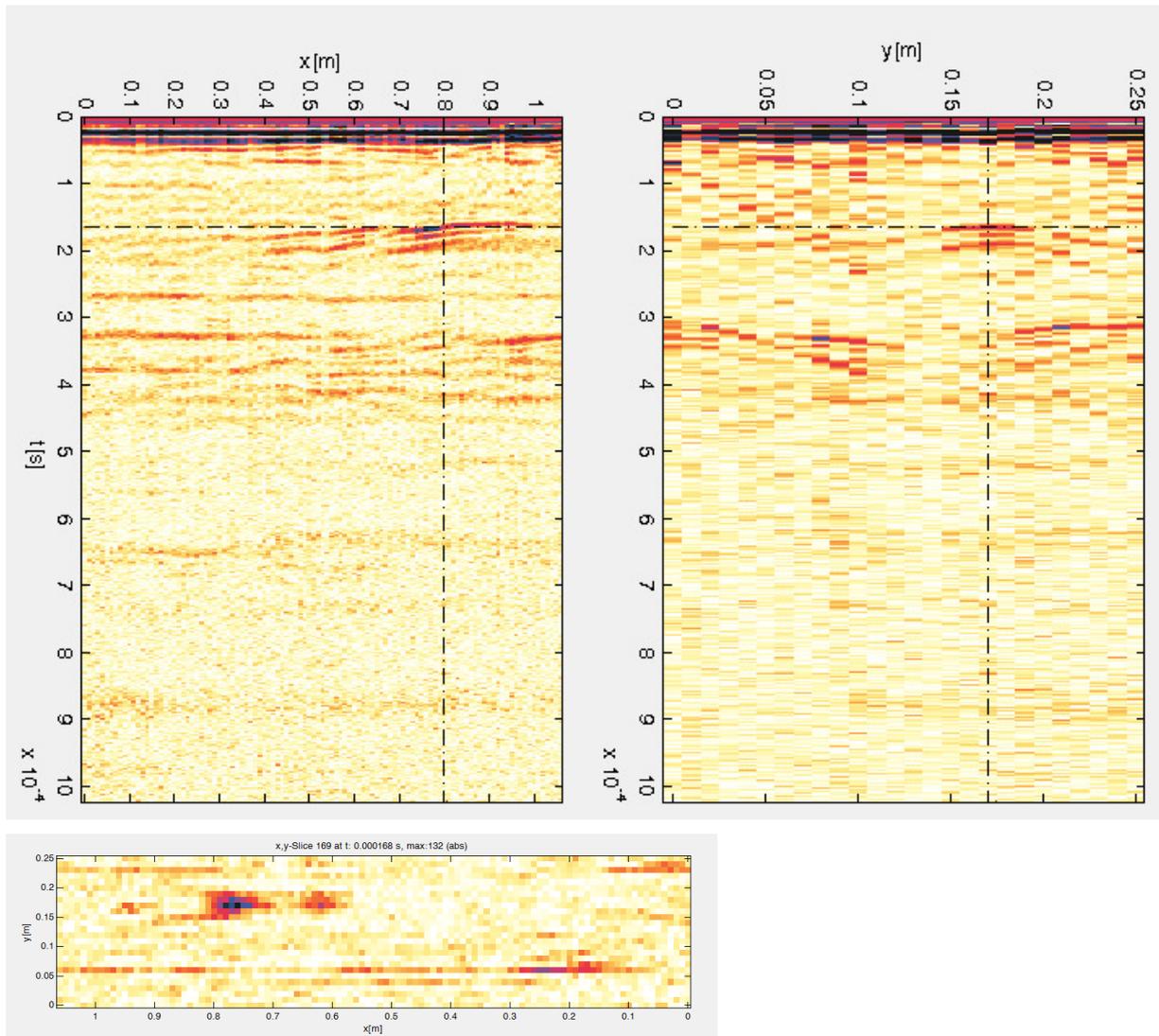


Bild 101 Fußgängerbrücke Fabeckstraße: Scannermessung Zeitbilder. Oben links: Zeit-B-Bild parallel $L \sim x$, Oben rechts: Zeit-B-Bild parallel $T \sim y$, Unten: Zeit-C-Bild $L \sim x/T \sim y$ -Schnitt bei $t = 171 \mu\text{s}$ (entsprechend $z = 106 \text{ mm}$ bei $C_{TL} = 1240 \text{ m/s}$)

Besonders deutlich ist im $B(y,t)$ -Bild die Reflexion der Oberflächenwelle OT1 am linken Rand zu erkennen. Auf der linken Seite (für $y = 0$), beginnend mit dem Rückwandecho, erkennt man außerdem die Reflexion aus dem rechten Winkel, der von der Rückwand und der Seitenwand des Trägers gebildet wird. Der Verlauf dieser Reflexionskurve ergibt sich aus dem Abstand des Prüfkopfes und aus der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Faserrichtung. Solche ortsbekanntens Reflektoren werden im Rahmen der Rekonstruktionsrechnung mit elliptischer Geschwindigkeitsanpassung zur Ermittlung des tatsächlichen Verlaufs der anisotropen Gruppengeschwindigkeit verwendet.

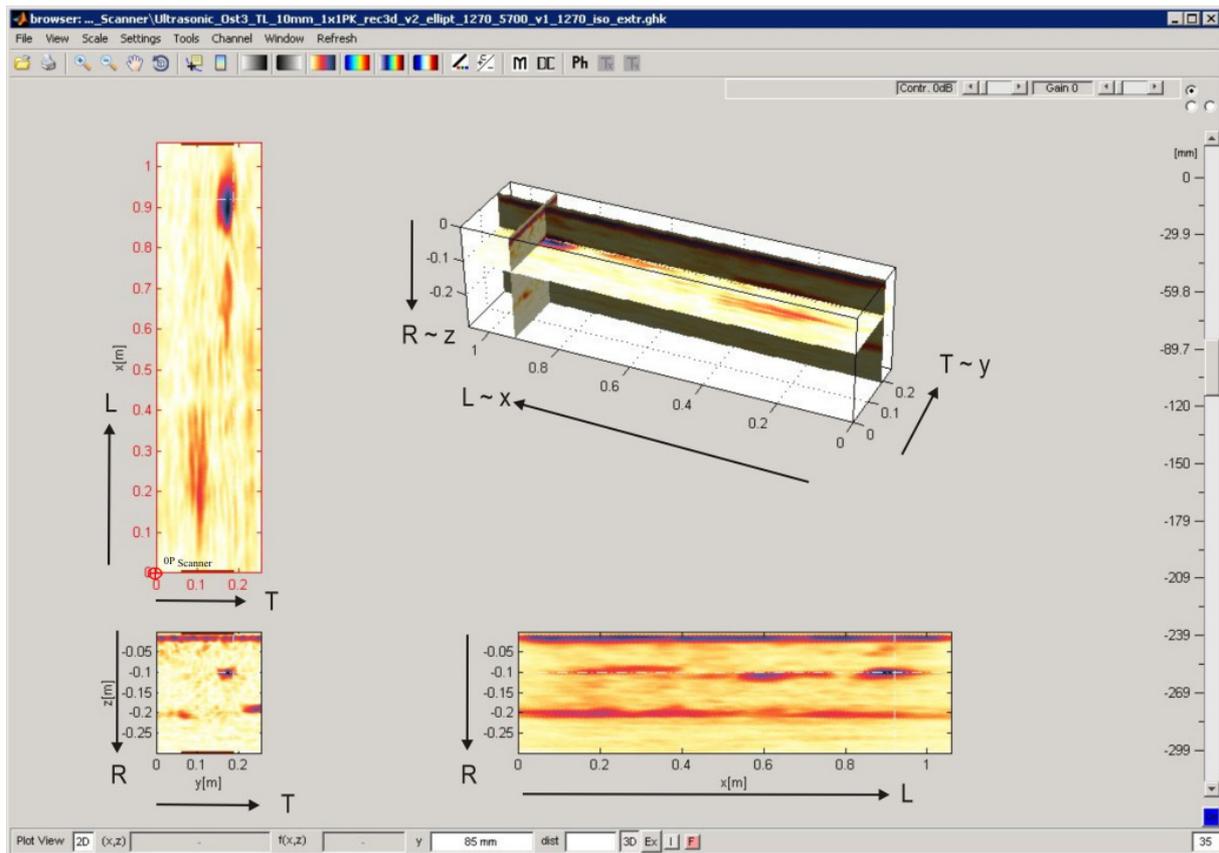


Bild 102 Fußgängerbrücke Fabeckstraße: Scannermessung 1+1, Messfeld Ost3, TL, Auswertung mit Zeit-SAFT, Geschwindigkeitsanpassung elliptisch (C_{LT} : 5700 m/s, C_{RL} : 1270 m/s). Der Koordinatenursprung (0-Punkt Scanner) ist rechts im Messfeld (vgl. Bild 104 unten).

Bild 102 zeigt das Ergebnis der Rekonstruktionsrechnung des in Bild 101 diskutierten Datensatzes. Die Geschwindigkeiten ergeben sich dabei mit der elliptischen Anpassungsmethode zu ($C_{LT} = 5700$ m/s und $C_{RL} = C_{TL} = 1270$ m/s). Im dargestellten Tiefenschnitt (SAFT-C-Bild) sind Reflektoren in der Tiefe um $z = 102$ mm zu erkennen, die in $L \sim x$ Richtung ausgedehnt jedoch in $T \sim y$ -Richtung auf knapp 30 mm um $y = 170$ mm begrenzt sind.

Der 3D-Darstellung in Bild 102 ist zu entnehmen, dass zusätzlich zum Rückwandecho in zwei Ebenen Streuer aus dem Inneren des Bauteils abgebildet werden (für $z = 92$ mm und 104 mm). Die Rückstreuintensität dieser Reflektoren sind in Bild 103 als SAFT-C-Bilder dargestellt.

Dabei handelt es sich um das Ergebnis von zwei unterschiedlichen Rekonstruktionsrechnungen des selben Datensatzes. Links (Bild 103a) erfolgte die Rekonstruktion mit der elliptischen Näherung (entsprechend Bild 102), rechts (Bild 103 b) wurde die Geschwindigkeit isotrop angesetzt. Es ist zu erkennen, dass im ersten Fall die Ortsauflösung in x -Richtung besser ist, was darauf zurückgeht, dass bei der Rekonstruktionsrechnung die schiefwinkligen Ausbreitungsrichtungen gemäß der winkelabhängigen Gruppengeschwindigkeit berücksichtigt werden. Die isotrope Rekonstruktion der Scannerdaten zeigt dagegen deutlich eine Wanderung des Fehlers bei Änderung der C-Bild Tiefe, was auf die qP-Welle hindeutet. Die Abbildung ist hier also ungenau und hängt von der dargestellten Tiefe ab.

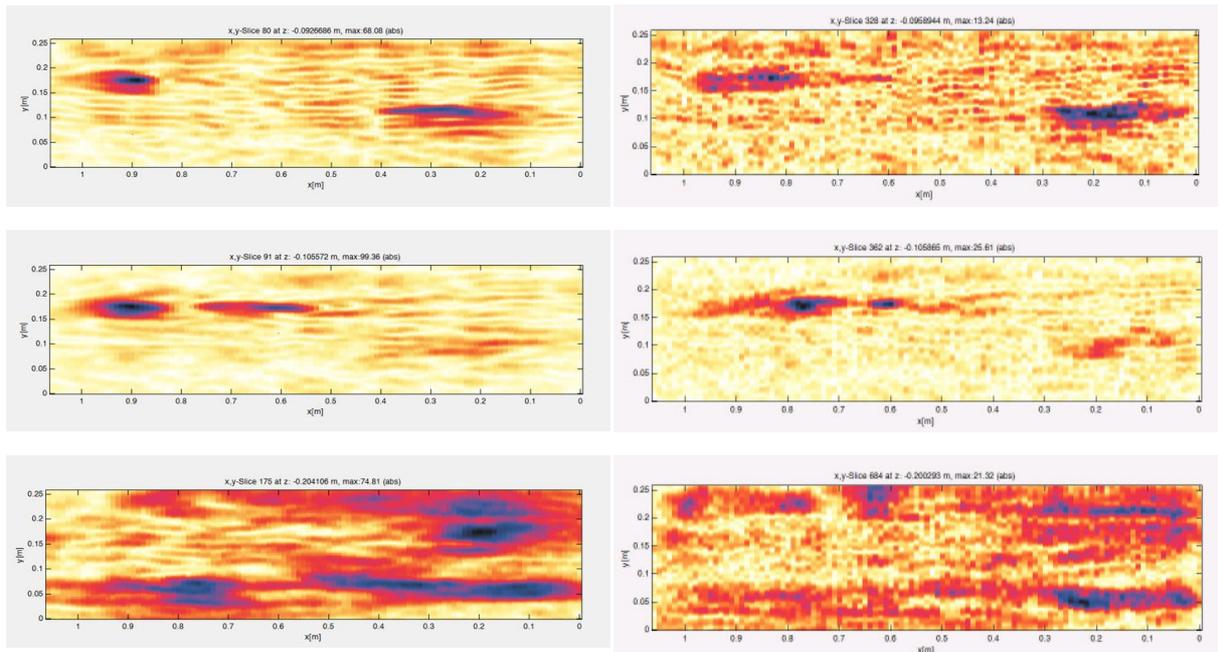


Bild 103 Fußgängerbrücke Fabekstraße: Scannermessung 1+1, TL, Auswertung mit Zeit-SAFT, SAFT-C(L,R)-Bilder in 3 Tiefen: 92 mm, 106 mm, 204 mm (Rückwand)
 a) (links) Geschwindigkeitsanpassung elliptisch in L-Richtung, isotrop in der RT-Ebene
 b) (rechts) Geschwindigkeit isotrop ($c = 1240$ m/s)
 Der Koordinatenursprung ist rechts, die C-Bilder entsprechen also der Ansicht des Messfeldes gemäß Bild 100.

Da die Reflektoren in L-Richtung lang ausgedehnt und in R-Richtung gemäß dem SAFT-B($R \sim y/T \sim z$)-Bild (Bild 102) auf ca. 30 mm begrenzt sind, legt das die Deutung der Reflektoren als gerissene Bereiche einzelner oder mehrerer benachbarter Lamellen des Brettschichtholz-Trägers nahe. Wie oben im Zusammenhang mit den Zeit-B-Bildern diskutiert (Bild 101), ist aber eine eindeutige Zuordnung als einzelne senkrechte Risse nicht möglich. Die Reflektoren können zunächst nur als Auffälligkeit klassifiziert werden. Eine genauere Analyse wird erst nach einer späteren Verifizierung möglich zu sein.

Dennoch ermöglicht die bildgebende Auswertung der Ultraschallecho-Messungen eine genaue Ortsangabe der auffälligen Reflektoren. Gemäß der y -Koordinate der Reflexionen liegen sie in Lamelle 8 und 5 und erstrecken sich je nach Reflektor über eine Länge von 200 mm bis 500 mm in $L \sim x$ -Richtung.

Mit Kenntnis der inneren Reflektoren lassen sich einige Abschattungen im SAFT-C-Bild der Rückwand zuordnen. Umgekehrt lässt sich aber allein aus der Intensitätsverteilung des Rückwandechos keine Lokalisierung der Reflektoren ableiten. Der Vergleich der Abschattung des Rückwandechos mit den beiden Geschwindigkeitsannahmen bei der Rekonstruktion zeigt auch hier den Vorteil der elliptischen Geschwindigkeitsnäherung. Man erkennt eine etwas deutlichere Abschattung des Rückwandechos durch die inneren Reflektoren in Bild 103a, unten, gegenüber dem isotropen Geschwindigkeitsansatz.

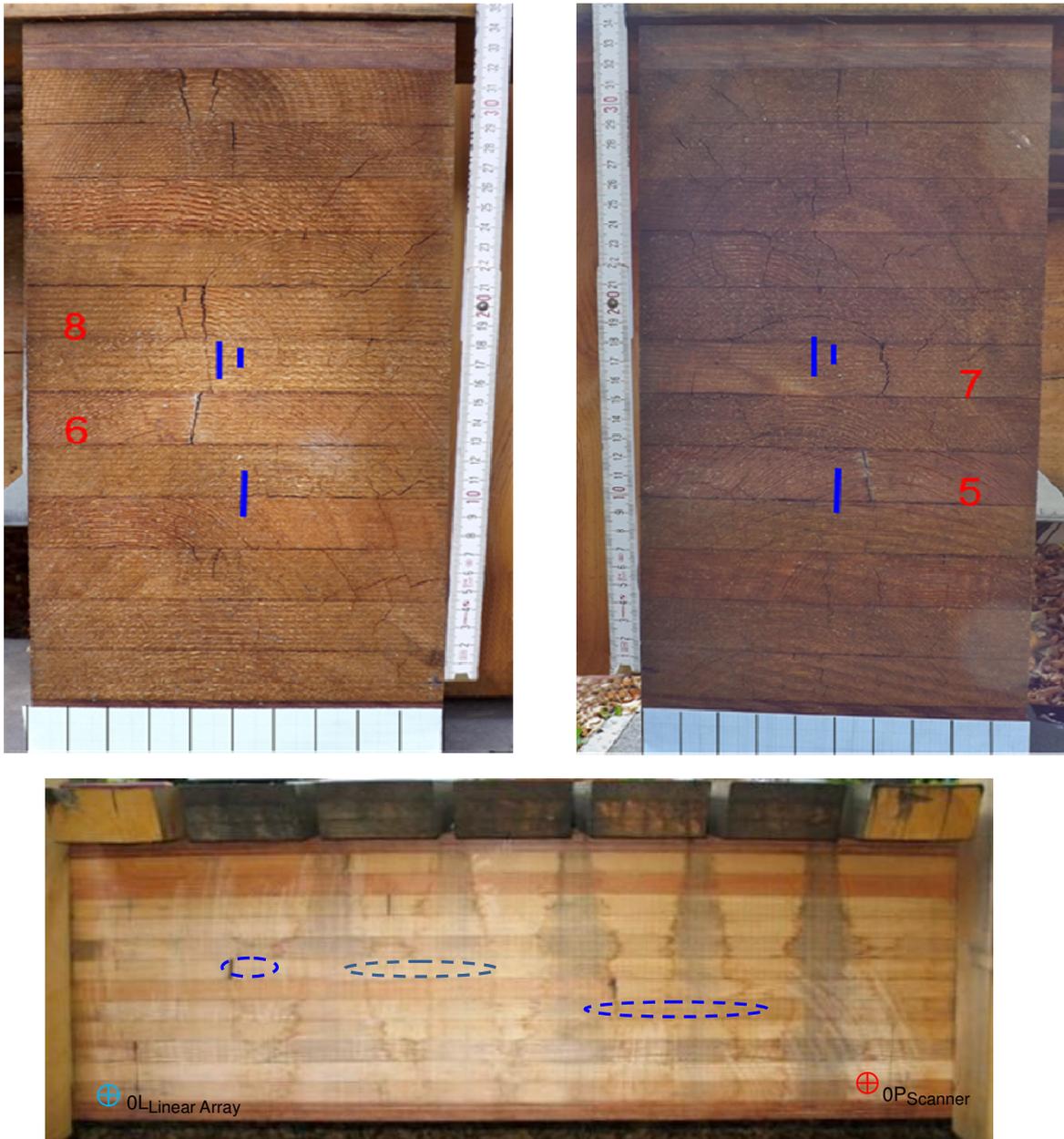


Bild 104 Fußgängerbrücke Fabeckstraße: Seitenansichten des Osträgers mit eingezeichneter Lage der mit 3D-Ultraschall Imaging georteten Reflektoren (blau: Scanner 1+1). Die Position des Gliedermaßstabes kennzeichnet die Messseite, dessen Nullpunkt den Ursprung des Messkoordinatensystems. Einteilung der z-Achse: 20 mm. Rote Ziffern: Nummer der Lärchenholzlamelle. Links: linke Seite (Süd), Rechts: rechte Seite (Nord) unten: Ortung der Reflektoren in der Ansicht des Messfeldes gemäß (Bild 103a), Reflektoren aus verschiedenen Tiefen: dunkelblau aus 92 mm, hellblau aus 106 mm, X (rot), rechts: Ursprung Messfeldkoordinaten mit Scanner, X (hellblau): Ursprung Messfeldkoordinaten Linear Array

Zum Vergleich sind in Bild 104 die Orte der mit Ultraschall georteten Reflexionen in das Foto der Träger eingezeichnet. Der Nullpunkt der R,y-Achse entspricht dabei dem Nullpunkt der Scannermessung. Die blauen Linien entsprechen dabei dem Ergebnis der Scannermessung mit der 1+1-Prüfkopfanzordnung. Wie an der Lage der seitlich sichtbaren Risse erkennbar (z.B. prägnante Risse von links in den Lamellen 6 und 8, sowie von rechts in den Lamellen 5 und 7) sind keine durch die ganze Längsachse der Brücke laufenden Risse zu erwarten.

Aus der Auswertung ergibt sich auch eine Ortung der auffälligen Bereiche in der Draufsicht (Bild 104, unten).

Scannermessung mit 1+1 Prüfkopf in TR-Polarisation und TT-Polarisation

Analoge Messungen wurden mit dem selben Messraster auch in den beiden anderen Polarisationsrichtungen durchgeführt (Scherwellenkopf 1+1 mit Polarisation in R,y-Richtung und Druckwellenprüfkopf 1+1, Mittenfrequenz 75 kHz, Schallrichtung und Polarisation in T z-Richtung (TT).

Bild 105 zeigt als Beispiel zwei Messlinien der TR Polarisation als Zeit-B-Bild. Es sind keine Anzeigen zu erkennen, die auf die Ortung eines Streuers hinweisen, demzufolge ergeben sich aus den Rekonstruktionsrechnungen mit verschiedenen Geschwindigkeitsmodellen keine zusätzlichen Erkenntnisse.

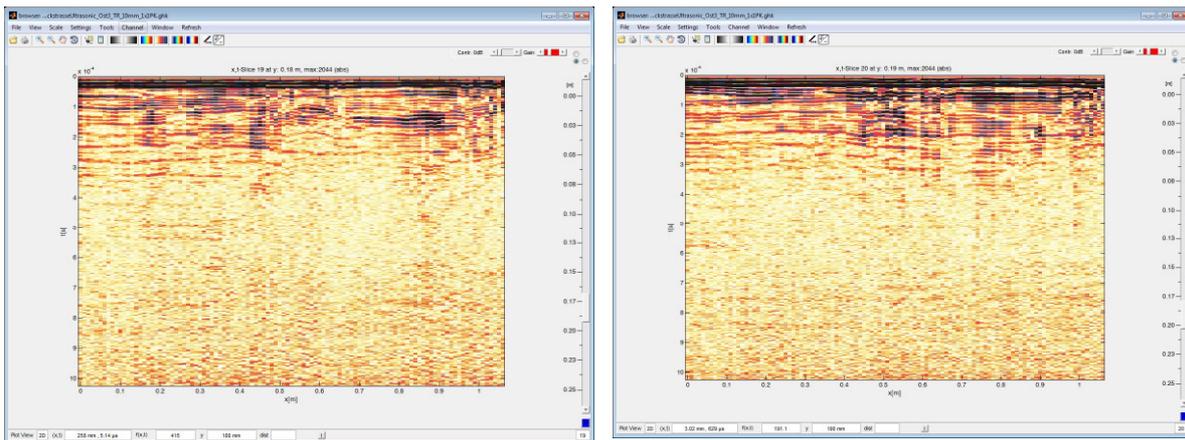
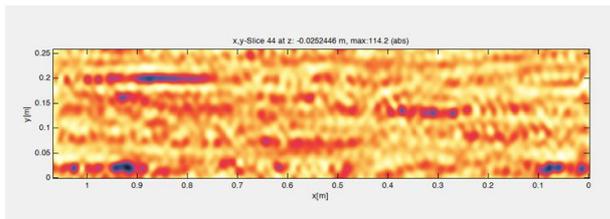
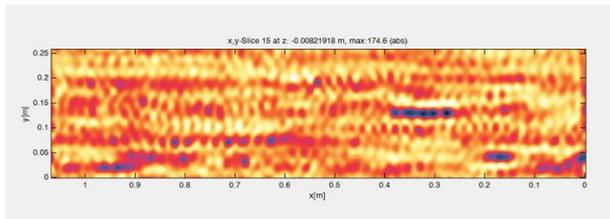


Bild 105 Fußgängerbrücke Fabeckstr., Scannermessung, Scherwellenprüfkopf 1+1, Polarisation TR

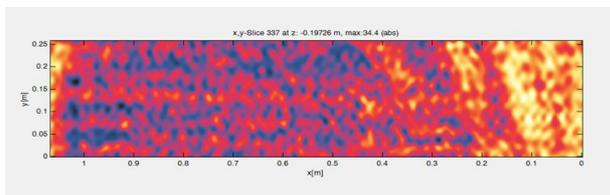
Auch das Ergebnis der Scannermessung mit Druckwellen in T-Richtung ergibt keine deutliche Abbildung von Streuern (Bild 106). Die Messdaten sind in L-Richtung rekonstruiert und interpoliert. Lediglich für die Rückwand ergibt sich ein Maximum bei $z = 197$ mm. Die Wellen werden überwiegend in den Lamellenschichten geführt, sind also in T~y-Richtung quasi unabhängig voneinander. Dadurch werden die Schrägbeschallungen und Reflexionen weitgehend unterdrückt, deswegen ergibt die 3D-Rekonstruktion keine zusätzlichen Informationen. Die stellenweise erkennbaren Intensitätsmaxima stimmen nicht mit den Ergebnissen aus der TL-Polarisation überein.



$z = 8 \text{ mm}$



$z = 25 \text{ mm}$



$z = 197 \text{ mm (Rückwand)}$

Bild 106 Fußgängerbrücke Fabeckstraße: Scannermessung in TT-Polarisation (Druckwellen). SAFT-C-Bilder in 3 Tiefen

Messung mit Linearem Array

Das Messfeld Ost3 wurde zusätzlich mit dem Linear Array mit der Polarisation in L,x-Richtung mit einer Schrittweite von 5 cm gemessen (Bild 107).



Bild 107 Fußgängerbrücke Fabeckstraße: Messung mit linearem Array an Messfeld Ost3

Das Ergebnis der 3D Rekonstruktion mit elliptischer Geschwindigkeitsanpassung zeigt Bild 108 in den verschiedenen Ansichten. Das Fadenkreuz ist auf den Reflektor bei $L \sim x = 210 \text{ mm}$ und $T \sim z = 100 \text{ mm}$ positioniert. Die Ergebnisse entsprechen im Wesentlichen der Scannermessung in TL-Polarisation.

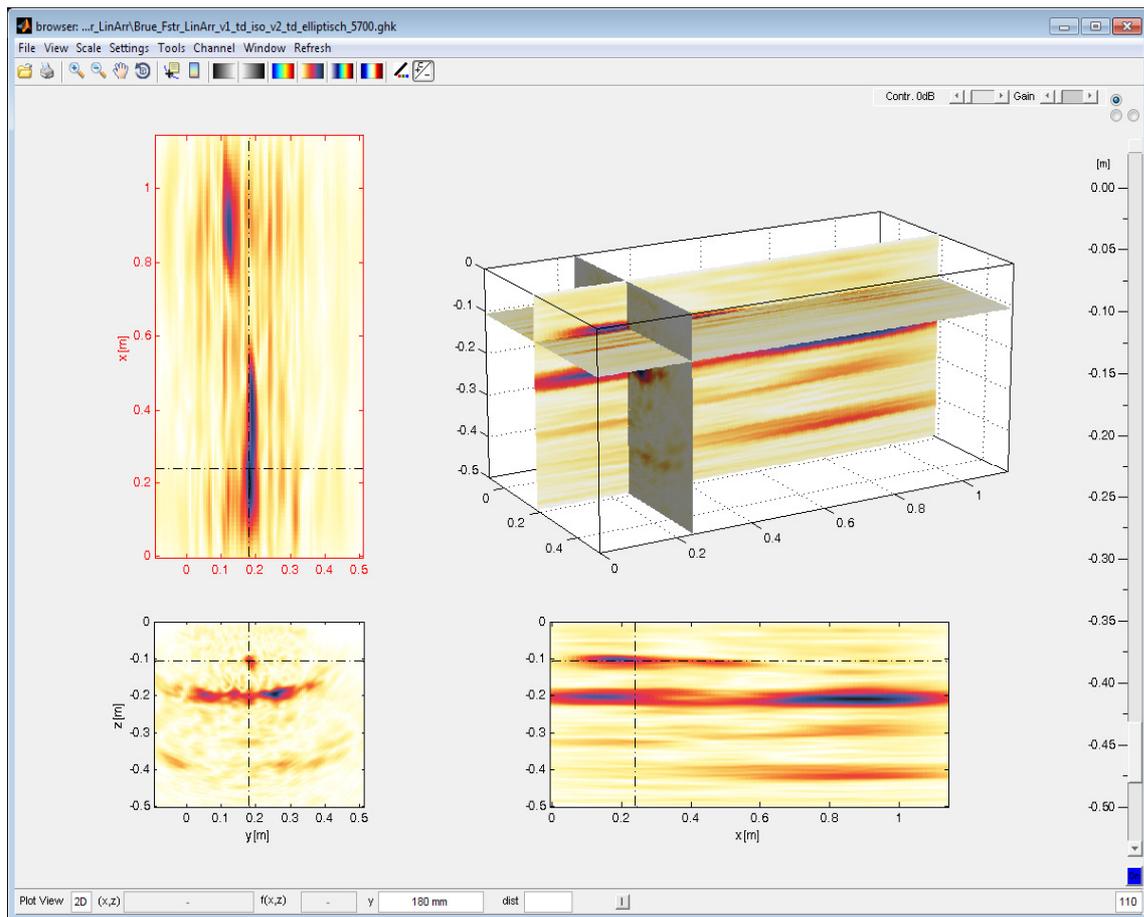
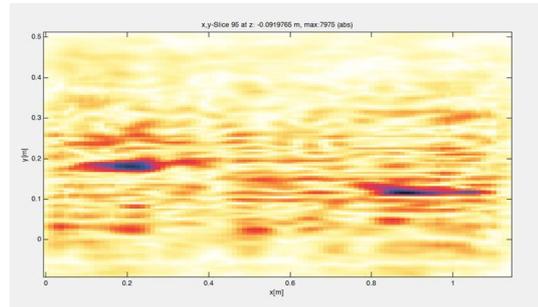
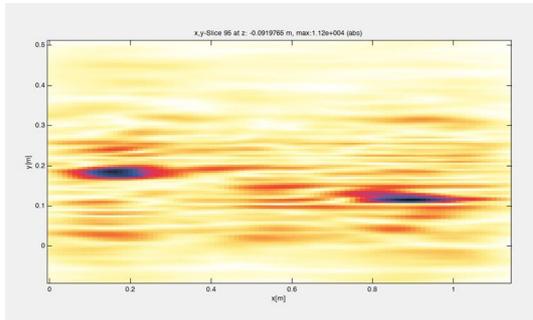
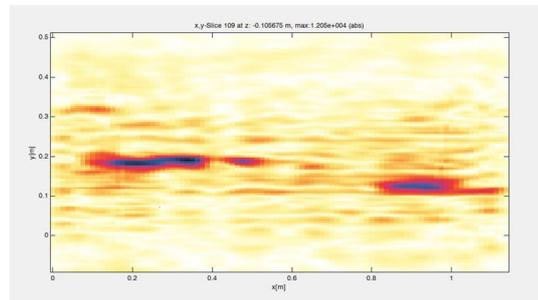
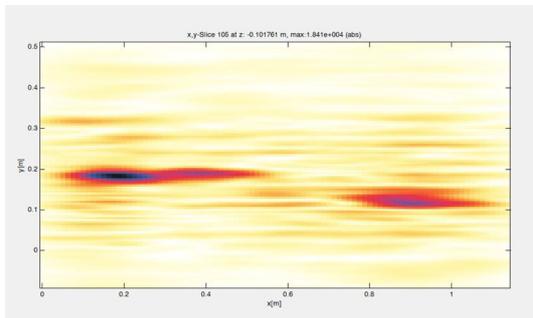


Bild 108 Fußgängerbrücke Fabbeckstraße: Ergebnis Messfeld Ost3 mit Linearem Array, SAFT-Auswertung mit elliptischer Geschwindigkeitsanpassung ($C_{TL} = 5700$ m/s, C_{TR} , $C_{TT} = 1277$ m/s wie für Scannermessung). Der Koordinatenrichtung ist nach links orientiert, entsprechend Bild 100

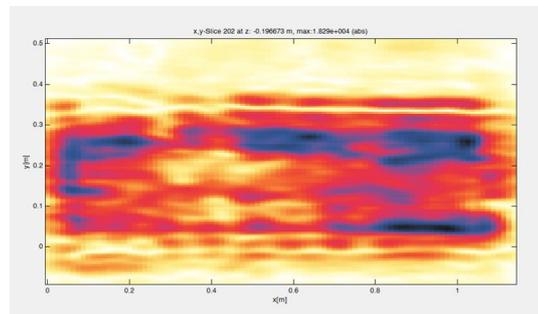
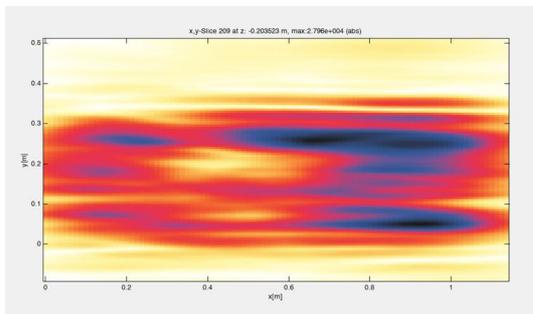
Die C-Bilder in den verschiedenen signifikanten Tiefen sind in Bild 109 für die Rekonstruktionsrechnung mit elliptischer Geschwindigkeitsanpassung (links) und isotroper Geschwindigkeit (rechts) dargestellt. Es fällt auf, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen der Rekonstruktion mit elliptischem und isotropen Geschwindigkeitsansatz gibt, im Gegensatz zu der Auswertung der Scannermessungen (vgl. Bild 103). Ein möglicher Grund dafür ist, dass die Messung mit dem Lineararray weniger Kopfwellenanteile enthält, die eine seitliche Abbildung erst ermöglichen würden.



$z = 92 \text{ mm}$



$z = 106 \text{ mm}$

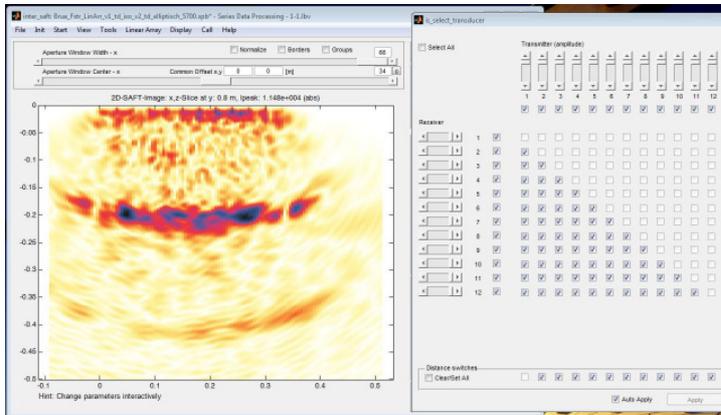


$z = 196 \text{ mm (Rückwand)}$

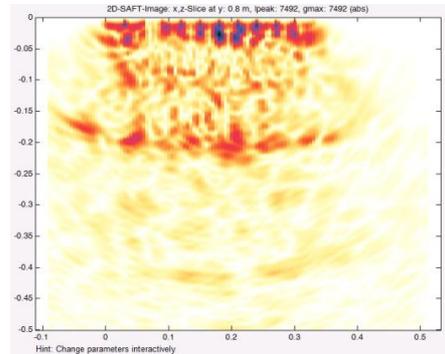
Bild 109 Fußgängerbrücke Fabekstraße: Messfeld Ost3, Messung mit Linear Array, Polarisation TL, SAFT-C-Bilder in 3 signifikanten Tiefen.

- a) Geschwindigkeitsanpassung elliptisch,
- b) Rekonstruktion mit isotroper Geschwindigkeit in L-Richtung

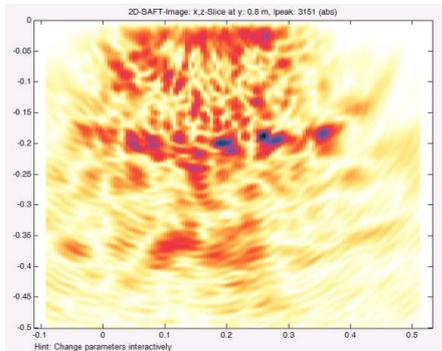
Die Ergebnisse des mit dem Linear Array aufgenommenen flächigen Datensatzes lassen sich zusätzlich dahingehend auswerten, ob eine Querdurchschallung durch die Lamellengrenzen zur Abbildung der Reflektoren beiträgt. Dazu dient ein spezielles Auswertungstool im Softwarepaket inter-saft, bei dem ein bestimmter Abstand von Sende- und Empfangskopf gewählt werden kann, der für die Rekonstruktionsrechnung ausgewertet wird (siehe Kapitel 5.1.4).



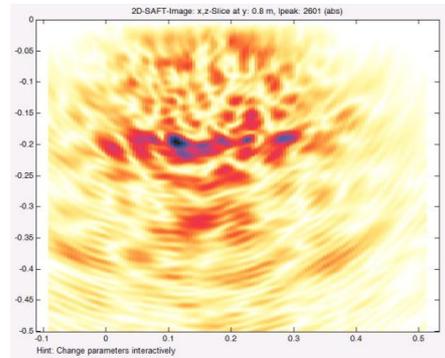
Alle Abstände



Abstand 1 (2 cm)



Abstand 3 (4 cm)



Abstand 6 (12 cm)

Bild 110 Fußgängerbrücke Fabeckstraße: Messung mit linearem Array, Abbildung des Rückwandechos mit unterschiedlicher Berücksichtigung der Sende- und Empfangskopfabstände

Dies ist in Bild 110 erläutert. Normalerweise werden alle Sende- und Empfangspositionen für die Rekonstruktionsrechnung herangezogen, 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. In Bild 110 ist das am Beispiel der Prüfkopfpaaire 1 (also Abstand 2 cm), 3 (4 cm) und 6 (12 cm) demonstriert. Das Rückwandecho ist auch bei großen Prüfkopfabständen eindeutig abgebildet, was bei einer Lamellenbreite von 28 mm nur mit Querdurchschallung möglich ist.

Fazit

Die Fallstudien an der Fußgängerbrücke Fabeckstraße zeigt, 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 Verifizierung 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.

7.2.2 Balkone aus Brettschichtholz

Es fanden noch weitere Messungen an geschädigten Balkonkonstruktionen aus Brettschichtholz statt, die von einem Partner vermittelt wurden.

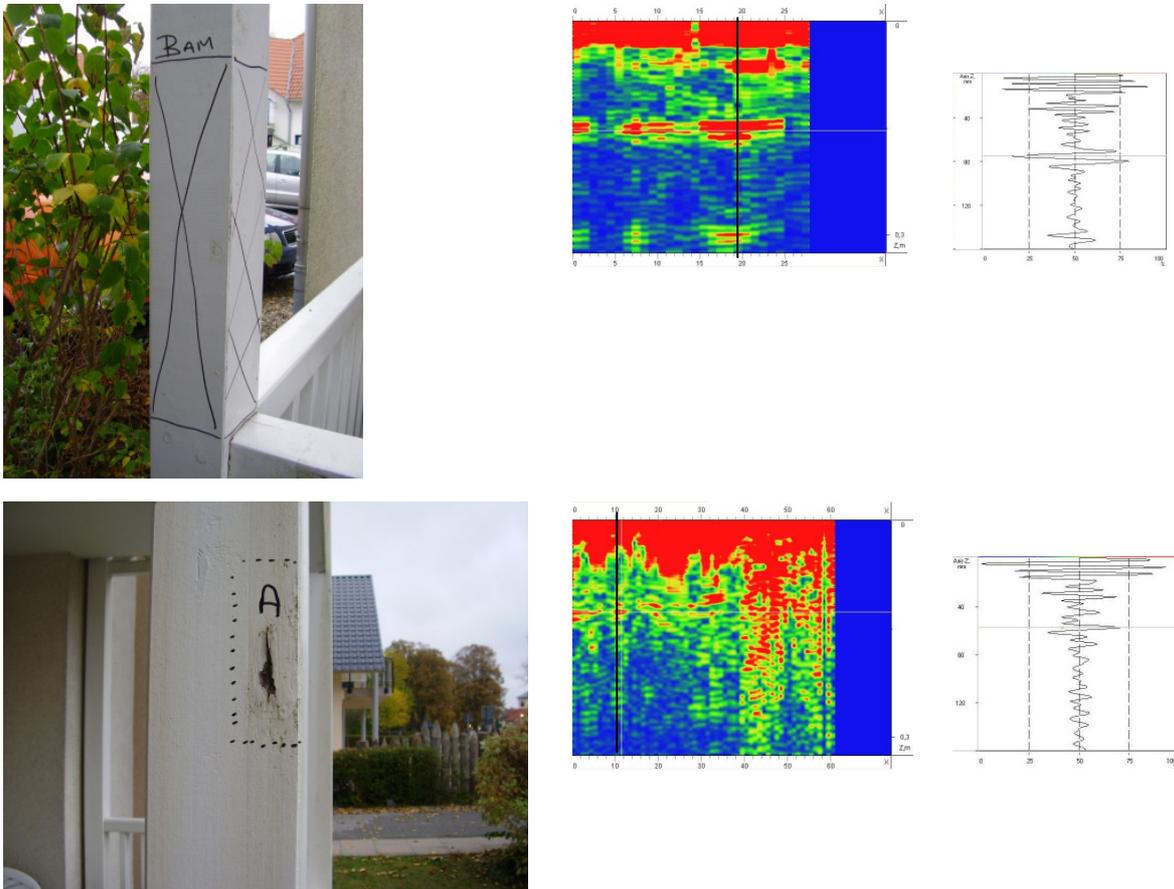


Bild 111 Balkonstützen
oben: Stütze ohne Defekt, unten: Stütze mit Defekt
rechts: Messergebnisse vom A1220 (dabei links die Darstellung im B-Bild, rechts im A-Bild)
der Cursor zeigt jeweils die Lage des nebenstehenden A-Bildes an

Oben in Bild 111 ist das Messfeld auf einer intakten Stütze eingezeichnet. Die Rückwand der Balkonstütze ist im B-Bild (rechts) gut sichtbar. Es ist auch der zweite Rückwandreflex erkennbar. Dagegen ist an einer defekten Stütze Bild 111 (unten) die Rückwand nicht mehr deutlich erkennbar. Es kommt zu Abschattungen des Signals. Dies entspricht der bekannten indirekten Ortung von Fehlstellen aufgrund der Abschattung des Rückwandechos.

Mit dem Lineararray wurde versucht, die Fehlstellen abzubilden. Diese Messungen sind aber schwierig zu interpretieren, da die Stützen deutlich schmaler sind, als die aktive Länge des Lineararrays (33 cm). Die Stützen haben nur eine Auflagefläche von 12 cm X 15 cm. Es finden also nur ca. 4 bis 5 Ultraschall-Messkopfreihe einen ausreichenden Kontakt und sind somit aktiv. Deshalb sind die so gewonnenen Messergebnisse nur eingeschränkt interpretierbar.

Links in Bild 112 ist die Rückwand der Stütze bei 12 cm gut erkennbar, wenn das Lineararray auf die breitere Seite der Stütze positioniert ist. Das Rückwandecho ist eindeutig, bei dem

Signal in einer Tiefe von 5 cm ist unklar, ob es sich um eine Fehlstelle handelt oder um einen Artefakt.

Weitere Untersuchungen an diesen Balkonstützen werden noch folgen, da im Zuge der Restaurierung der Balkone die defekten Stützen entfernt und der BAM zu Untersuchungszwecken zur Verfügung gestellt werden. Dies konnte vor Abschluss des Vorhabens nicht verwirklicht werden. Diese Teile und Abschnitte aus einem anderen Rückbau werden nachträglich an der BAM untersucht und die Ergebnisse verifiziert.

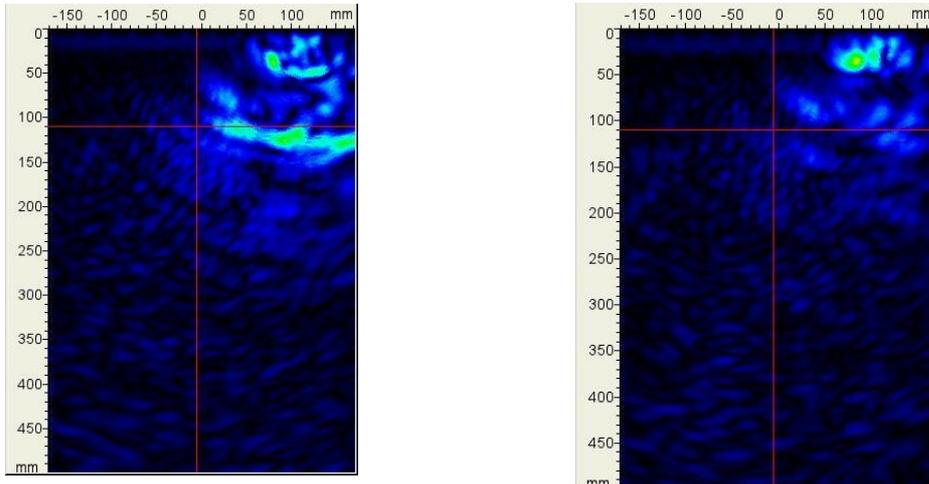


Bild 112 Balkone aus Kühlungsborn, Messungen mit dem Lineararray
rechts: Rückwandecho bei 12 cm, der Reflex bei 5 cm ist noch ungeklärt
links: aufgrund der geringen Breite der Stütze (12 cm) waren nur 4 Schallkopfreihen des Arrays aktiv.

8.1 Zusammenstellung und Lösbarkeit von Prüfaufgaben

Gemäß dem Arbeitsplan wurden die dreidimensional abbildenden Ultraschallverfahren zunächst an künstlich eingebrachten Reflektoren in geeigneten Holzbauteilen entwickelt und optimiert. Dabei standen die Herstellung und Überprüfung von homogen anisotropen Probekörpern sowie die Experimente und die Entwicklung geeigneter Rekonstruktionsverfahren unter Verwendung von angepassten richtungsabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Vordergrund. Im Sinne der in Kapitel 2.3 vorgestellten mehrstufigen Vorgehensweise ist es sinnvoll, dies zunächst mit idealisierten Reflektoren, insbesondere Kreisscheibenreflektoren bekannter Größe, zu tun.

Als Objekte aus der Praxis wurde im wesentlichen Brettschichtholz aus Fichte und alpiner Lärche untersucht. Diese Untersuchungen geben wichtige Hinweise auf zu lösende Prüfaufgaben und insbesondere den störenden Einfluss von Rissen und dem Wechsel der Jahresringkrümmung. Die fundierte Aufstellung eines Leistungskataloges ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich.

Insbesondere konnten die Prüfaufgaben an Holzbalken im Denkmalschutz noch nicht systematisch behandelt werden, da es sich dabei vom Prinzip her um Bauteile mit einem großen Anteil von gekrümmten Jahresringen handelt (Viertel-, Halb- oder Vollholzbalken).

Im Folgenden wird die Lösbarkeit der von der begleitenden Arbeitsgruppe und den beteiligten Partnern herangetragenen Prüfaufgaben auf Basis der bereits bearbeiteten Prüfaufgaben prognostisch beurteilt. Hierzu zählt auch eine Einschätzung, in welchen Fällen die direkte bildgebende Darstellung der Fehlstelle vorteilhaft ist gegenüber der indirekten Erfassung durch die Ultraschall-Abschattungsverfahren (Identifikation der abgeschatteten Bereiche einer ansonsten deutlichen Anzeige des Ultraschall-Rückwandechos)[13].

Abbildung von abgegrenzten Bereichen

- **Lokalisierte Bereiche mit Pilzbefall**
Speziell lokalisierte Schädigungsbereiche, wie sie z.B. vom Balkenblättling erzeugt werden, sollten mit dem Abbildungsverfahren lokalisierbar sein (analog zu Flachbodenbohrungen). Bei diesen kleineren befallenen Bereichen ist eine Ortung mit dem Bohrwiderstandsverfahren wegen der notwendigen dichten Bohrlochabstände sehr aufwändig und das indirekte Abschattungsverfahren wahrscheinlich nicht sicher genug.
- **Äste, Astigkeit**
Hier ist ein plötzlicher Übergang zwischen Holzstruktur und Ast bzw. auch Astloch zu erwarten. Eine Abbildung sollte in vielen Fällen möglich sein. Eine Studie über das notwendige Verhältnis von Tiefe und Astdurchmesser ist hier sinnvoll.

Diffus verteilte Bereiche

- **Fraßlöcher durch Insektenbefall**
Wegen des kleinen Durchmessers der Fraßlöcher (wesentlich kleiner als die Wellenlänge) ist keine direkte Abbildung mit Ultraschall möglich, es kann auch als Schallsumpf wirken. Sinnvoller Einsatzbereich des Abschattungsverfahrens.
- **Mit Fäulnis befallene Bereiche ohne deutliche Grenzfläche**
Hierbei handelt es sich um diffus verteilte Streuer, die zudem deutlich kleiner sind als die Wellenlänge. Hier ist keine deutliche Abbildung zu erwarten, sondern eher ein „Schallsumpf“. Sinnvoller Einsatzbereich des Abschattungsverfahrens.

Einbauteile, Verbindungsmittel

- Bolzen
 - a) eingepresste Bolzen: Dünne Luftschichten sind von Bohrungen gleichen Durchmessers mit Ultraschall nicht zu unterscheiden. Inwieweit bei großem Pressdruck eine für die Ultraschallpulse direkte Grenzfläche Holz/Metall entsteht, ist noch nicht untersucht.
 - b) verklebte (verleimte) Bolzen: In diesem Fall ist zu erwarten, dass der Schall über die Leimschicht direkt in das Metall einkoppelt. Fehlstellen der Verklebung könnten sich als Totalreflexion abzeichnen (muss noch untersucht werden).
- Verklebte Bleche
es gilt im Wesentlichen dasselbe wie für Bolzen.

Risse

- Risse durch Last
Dies sind üblicherweise schräge Risse, die sich je nach Dimension mit der direkten B-Bild-Darstellung erfassen lassen, s.a. [9]. Ein Vorteil der direkten Bildgebung müsste untersucht werden.
- Risse in Lastrichtung
Diese Risse sind in Brettschichtholz von der Seite abbildbar. Sie haben bei senkrechter Belastung keine Bedeutung für die Statik.
- Oberflächenparallele Risse (parallel zur Messfläche)
Diese Risse sollten in den meisten Fällen von der Messfläche wie ein Rückwandecho darstellbar sein.
- Risse an Verbindungsmitteln
Hierzu liegen noch keine Erfahrungen vor.

Speziell Holzprodukte

- Fehlverklebungen zwischen Lamellen
Unzureichende Verklebungen (Verleimungen) lassen sich mit dem Ultraschallverfahren nicht sicher nachweisen [17]. Es gilt: Eine Luftschicht zwischen den Lamellen zeichnet sich durch eine Totalreflexion ab. Diese Luftschicht kann aber überdrückt werden, außerdem kann eine Verklebung schalleitend sein, auch wenn sie nur unzureichend ausgeführt ist.
- Brettsperrholz (Kreuzlagenholz)
Nicht prüfbar. Durch den Wechsel der Faserrichtung in jeder Schicht wird die Ultraschallausbreitung quasi verhindert

Holzverbundbauweisen

- Holz-Beton-Verbund
Für die Holz-Beton-Verbundbauweise ist der schubsteife Verbund zwischen Beton und Holz erforderlich. Dieser wird meist über Verbindungsmittel realisiert. Ablösungen zwischen Beton und Holz können aber auf eine Überlastung hindeuten. Für diese Aufgabe müsste die B-Bild-Darstellung (Längsschnitt der Ultraschallechomessungen ohne Rekonstruktion) mit der Rekonstruktionsrechnung verglichen werden, um zu beurteilen, ob die Bildgebung einen Vorteil bringt.
- In Forschungsarbeiten wird zusätzlich zu den Verbindungsmitteln auch der Verbund zwischen dem selbstverdichtenden Beton und den Holzbauelementen für das Tragverhalten angesetzt [46]. Eine Überprüfung mit Ultraschallechoverfahren ist wie oben beschrieben möglich.

Speziell Denkmalschutz

- Lokalisierte Bereiche mit Würfelbruch
Diese Bereiche treten speziell als Folge eines Befalls mit Echtem Hausschwamm auf. Sie können trockenes Myzel enthalten und ggf. eine Entzündung über einen Schwelbrand weiterleiten. Die Ortung kann bei günstiger Dimensionierung über das Abschattungsverfahren funktionieren. Eine Studie über den Vorteil der direkten Ultraschallabbildung wäre wünschenswert.
- Historische Tragkonstruktionen aus Eichenholz
Eichenholz wurde im Rahmen des Vorhabens nicht systematisch untersucht. Es sind aber ähnliche Entwicklungen wie für Fichte aussichtsreich (weitere Forschung notwendig).
- Türschwellen aus Eichenholz
Ein Teil der Aufgaben müsste über die Abschattungsmethode lösbar sein.
- Kleinflächige Bauteile, Querschnitt ca. 12 bis 30 cm
Bildgebung mit Handmessungen erfordert eine sehr präzise Festlegung und Einhaltung der Messpunkte. Im Rahmen des Vorhabens noch nicht untersucht.
- Ortung von verdeckten Verbindungen und Holznägeln
Die genaue Abbildung solcher Verbindungen erfordert die Ortung kleiner Reflektorflächen (Seitenlängen von 2 bis 5 cm) im Abstand von 5 bis 10 cm von der Messoberfläche in Holzbalken. Eine Abbildung ist ggf. mit einzelnen Punktkontaktprüfköpfen möglich, muss aber noch systematisch untersucht werden.

8.2 Gerätekonzept für die praxiserichtete Ultraschallprüfung

Die im Rahmen des Vorhabens erzielten Ergebnisse ermöglichen es, an zugänglichen Flächen Ultraschallechodaten aufzunehmen und aus den Rekonstruktionsrechnungen etwas über den inneren Zustand der Bauteile auszusagen. Die interessierenden Bereiche können in 3D-Ansichten dargestellt und ausgegeben, sowie Details per Mausklick zur genaueren Darstellung ausgewählt werden. Die genauere Analyse erfolgt meist mithilfe von 2D-Schnitten und -projektionen. Die dargestellten Ergebnisse wurden zum großen Teil mit Forschungsapparaturen unter Einbindung kommerzieller Komponenten erzielt.

In diesem Kapitel soll nun aufgezeigt werden, welche Anforderungen auf dem Weg zu einem praxisorientierten und dabei nutzerfreundlichen Mess- und Auswertesystem zu erfüllen sind. Dabei wird zunächst von den verwendeten Komponenten ausgegangen und entsprechende Erweiterungen und Modifikationen konzipiert. Hierbei handelt es sich um aus der Erfahrung des Vorhabens gewachsene Vorschläge und Abschätzungen, aber noch um keine direkt ausführbare Planung.

Prüfköpfe

Die verwendeten Punktkontaktprüfköpfe mit Trockenankopplung haben sich weitgehend bewährt. Der Frequenzbereich von 30 bis 80 kHz für die Scherwellenprüfköpfe und 70 bis 130 kHz und für die p-Wellen-Prüfköpfe ist für die bisher bearbeiteten Aufgaben geeignet. Es sollte in Zukunft aber noch überprüft werden, ob der Überlappungsbereich der verwendeten s- und p-Wellen-Prüfköpfe von ca. 70 bis 80 kHz groß genug ist, um die Ergebnisse bei Reflektoren, die mit beiden Polarisierungen zu orten sind, exakt zu vergleichen.

Für ein universell einsetzbares Gerät ist es erforderlich, die Anzahl der jeweils als Sender und Empfänger angesteuerten Prüfköpfe wählbar einzustellen. Eine sinnvolle Abstufung könnte hier sein: 1+1, 2+2, 4+4, 12+12 (jeweils Sender- und Empfängeranzahl).

Mit der im Rahmen der Arbeiten häufig genutzten kleinen Prüfkopffzahl (1+1) kann die Geschwindigkeit die größtenteils störenden Oberflächenwellen am genauesten bestimmt und diese dementsprechend am effektivsten unterdrückt werden. Außerdem ist die Ortsauflösung

mit den 1+1 Prüfköpfen optimal, was besonders für den oberflächennahen Bereich wichtig ist.

Die größere Prüfkopffanzahl (bis 12 + 12) dient einer vergleichsweise größeren Einschallungsintensität, was sich bei Prüfdicken oberhalb 10 cm, stark streuendem Material und evtl. schwachem Schalldurchgang in Leimfugen anbietet. Sinnvollerweise sollten diese Möglichkeiten auch kombiniert eingesetzt werden können: z. B. Ermittlung der Oberflächenwellen mit kleiner und die eigentliche Messung mit großer Prüfkopffzahl.

Die Anordnung und Datenaufnahme des linearen Arrays hat sich für die Untersuchung von Brettschichtholz wegen der Schrägeinschallung als sehr erfolgreich erwiesen. Es kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht angegeben werden, ob eine Modifikation der Gesamtzahl der Einzelprüfköpfe, deren Parallelschaltung in 4er-Bänken und dem Prüfkopfabstand sinnvoll ist. Ein solcher Vorschlag wäre insbesondere auch an dem Verhältnis von Aufwand zu Nutzen zu messen, da das existierende kommerzielle Gerät für Betonuntersuchungen optimiert ist und eine Modifikation sich nur bei entsprechenden hohen Stückzahlen lohnen würde.

Als Ergebnis der Forschung ergibt sich, dass eine orts aufgelöste multistatische Messung sowohl in die longitudinale Symmetrierichtung (L), als auch in die beiden jeweils anderen Richtungen (R oder T) bei Polarisation der s-Wellen in L-Richtung sinnvoll ist. Letzteres ist mit dem Linearen Array nicht möglich. Um schräg reflektierte Streusignale also in jeweils beide Symmetrierichtungen der Oberfläche zu erfassen, ist die Verwendung eines multistatischen Prüfkopfes sinnvoll. Ein solcher Prüfkopf ist als Prototyp bereits kommerziell entwickelt worden (ACSYS, als multistatischer Prüfkopf mit 6*6 Einzelköpfen), findet aber bisher für Holzuntersuchungen noch keine Anwendung. Für die Anwendung eines solchen Prüfkopfes ist die Reihenfolge der Sendempfangseinstellungen in Versuchen an bekannten Reflektoren zu ermitteln und die Auswertesoftware anzupassen.

Sendempfangseinheit

Die Experimente in Rahmen des Vorhabens wurden sowohl unter Verwendung des kommerziell erhältlichen Steuergerätes (A1220 Monolith) mit Sendempfangseinheit als auch einer Forschungsapparatur durchgeführt. Auf der Sendeseite deckt das kommerzielle Gerät alle Eigenschaften ab, die auch in der Forschungsapparatur realisiert sind. Auf der Empfangsseite ist bei dicken Bauteilen bzw. relativ starker Schallschwächung eine Auflösung der gemessenen Spannung der Empfangssignale von mindestens 12 bit erforderlich. Dies wird von dem kommerziellen Steuergerät nicht erreicht (10 bit).

Die Abtastfrequenz von einem MHz, also das bei der Zeitmessung verwendete Zeitinkrement von 1 μ s hat sich für alle Messungen als ausreichend erwiesen. Soweit es nicht erforderlich ist, die Ultraschallfrequenz wesentlich über 100 kHz zu erhöhen, reicht diese Abtastfrequenz vollständig aus. Man sollte sie aber sinnvollerweise nicht unterschreiten.

Flächige Messung

Für eine 3D-Bildgebung ist eine flächige Messung unerlässlich. Die im Vorhaben gewählten Schrittweiten betragen vorwiegend 5 bis 10 mm. Vor einer Entscheidung, welche Schrittweiten bei der Anwendung eines Baustellenscanners verfügbar sein sollen, ist eine systematische Studie über die Abhängigkeit der Abbildungsgenauigkeit von der Schrittweite und der Ultraschallfrequenz erforderlich. Beim bisher erreichten Stand der Technik ist ein äquidistantes Messraster erforderlich.

Die für die flächigen Messungen verwendeten Scanner müssen über einen Versetzmechanismus verfügen, der auf einem Abheben der Prüfköpfe von der Messfläche beruht. Ein gleitendes Versetzen würde die Prüfköpfe in kurzer Zeit beschädigen.

Bisher fehlen noch automatisch arbeitende Messsysteme, die für schwer zugängliche und Randbereiche geeignet sind.

Ein Versetzen der Prüfköpfe von Hand ist im Prinzip denkbar, es ist aber beim jetzigen Stand der Auswertungstechnik eine sehr genaue Einhaltung der Rasterweite und des Abstandes erforderlich. Positionierhilfen oder die automatisierte Bestimmung der aktuellen Position würden den Messprozess wesentlich beschleunigen. Eine entsprechende Entwicklung wird angestrebt.

Das Lineare Array oder ähnliche Messeinrichtungen können bei Messungen bis zu einigen Quadratmetern sinnvoll per Handmessung verwendet werden.

Datenübertragung, Messparameter

Bei den bisher verwendeten Konzepten erfolgen die Messwertaufnahme und die Auswertung auf getrennten Rechnern. Dies ergibt sich aus den relativ langen Messzeiten und einer notwendigerweise komfortablen Oberfläche für die 3D-Rekonstruktion.

Für die Übergabe der Messdaten und der geometrischen- und sonstigen Messparameter ist es sinnvoll, weitgehend standardisierte Übergaberoutinen zu verwenden, um Übertragungsfehler zu vermeiden.

Auswertung vor Ort

Für eine Auswertung vor Ort ist eine drahtlose Datenübertragung bzw. eine Kopplung von Mess- und Auswerterechner sinnvoll, um Teilergebnisse für eine größere Messfläche bereits während der Messung auswerten zu können.

9 Zusammenfassung

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. Zu diesem Zweck wird ein von der Universität Kassel entwickeltes Programmsystem für die Abbildung über anisotrope Rekonstruktionsrechnung, dessen Leistungsfähigkeit vor Beginn des Vorhabens lediglich für einige synthetische Ultraschalldaten nachgewiesen war, für Ultraschallmessdaten von Holzbauteilen angewendet und für die baupraktischen Aufgaben ertüchtigt. Über den Vergleich der Ergebnisse mit dem tatsächlichen Zustand der Holzbauteile erfolgt eine Bewertung des Verfahrens für verschiedene Holzarten und Aufgaben.

Nach Darstellung der messtechnischen und theoretischen Grundlagen (Scannende Ultraschallmessung), der Modellierung der Ultraschallausbreitung in Holz mit der **Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik (EFIT)** und der Rekonstruktionsrechnung (**3-D-SAFT, Synthetische Aperture Focusing Technique**) wird über folgende Arbeitsschritte berichtet:

- Bau von Probekörpern aus zunächst möglichst homogen anisotropem Material (d. h. geringer Einfluss der Jahresringkrümmung) für Buche-, Kiefern-, und Fichtenholz. Die Probekörper orientieren sich an der Bauweise von modernen Holzprodukten wie Brettschichtholz und Konstruktionsvollholz
- Testmessungen und entsprechende Rekonstruktionsrechnung an diesen Probekörpern
- Abbildungen von künstlich eingebrachten Reflektoren (Minderdicken und Flachbodenbohrungen)
- Analyse und Unterdrückung von störenden Oberflächenwellen
- Berücksichtigung der durch die Oberflächenwellen im Volumen entstehenden Kopfwellen
- Optimierung der Ultraschallprüfköpfe für eine bestmögliche Ortsauflösung
- Messreihen mit Polarisierung der Ultraschallpulse in die wesentlichen Symmetrierichtungen (Verwendung von Scherwellen und Druckwellen)
- Rekonstruktionsrechnung mit am Objekt angepassten Ultraschallgeschwindigkeiten
- Anwendung der Erkenntnisse für die Ultraschallabbildung für Messungen an Bauteilen aus der Praxis (Brettschichtholz)

Bevor praktische Anwendungen beispielhaft angegangen werden konnten, waren langwierige Grundlagenuntersuchungen an idealisierten Probekörpern erforderlich. Die wesentlichen Fortschritte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

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 Polarisierungen TL (Scherwellenausbreitung tangential zu den Jahresringen und

polarisiert in Faserrichtung), 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 praxisgerechte 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 praxisgerecht einsetzbar ist. Dafür sind weitere systematische Untersuchungen an entsprechenden Probekörpern und entnommenen Bauteilen erforderlich.

10 Danksagung

Die Autoren danken der Förderung durch die Bundesmittel der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie der fachlichen Betreuung und Förderung durch Hr. A. Schriewer.

Außerdem danken die Autoren den in Abschnitt 2.3.1 genannten Forschungsförderern und der begleitenden Arbeitsgruppe für ihre geldwerte Förderung, die fachliche Unterstützung insbesondere während der Arbeitsbesprechungen, die Vermittlung von Messobjekten und die Durchsicht des Entwurfes des Abschlussberichtes.

Neben den Autoren aus dem Fachbereich 8.2 der BAM und dem Fachbereich Elektrotechnik/Informatik der Universität Kassel haben nachfolgend aufgeführte Personen das Vorhaben wesentlich unterstützt:

Herr Dipl.-Ing. M. Merk (Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktionen der TUM) mit der Organisation eines Brettschichtholzträgers,

Herr D. Rätsch (BAM 4.1) und Herr M. Lange (BAM 8.2) durch Herstellung und Präparation zahlreicher Probekörper, Fr. Dr. I. Stephan (BAM 4.1) durch fachliche Beratung bei der Herstellung und Beschaffung von Probekörpern,

der Fachbereich 8.1 der BAM und das Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB e.V. Berlin) durch Ermöglichung der Testmessungen an einer Fußgängerbrücke und Unterstützung der Organisation (Hr. Dipl.-Ing.D. Hofmann).

Zahlreiche nicht namentlich genannte Mitarbeiter des Fachbereichs 8.2 (Zerstörungsfreie Schadendiagnose und Umweltmessverfahren) durch kollegiale Unterstützung.

11 Literatur

- [1] ACSYS: A1220 Monolith. Bedienungsanleitung. Fa. ACSYS, Moskau (2004).
- [2] Shevaldykin, V., Samokrutov, A. and V. Kozlov: Ultrasonic Low-Frequency Short-Pulse Transducers with Dry Point Contact. Development and Application. In: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, V66, Berlin (2003).
- [3] Kozlov, V.N., Samokrutov, A.A. and V.G. Shevaldykin: Ultrasonic Equipment for Evaluation of Concrete Structures Based on Transducers with Dry Point Contact. In: Al-Quadi, I. and G. Washer (eds.); Proceedings of the NDE Conference on Civil Engineering, 14.-18. August 2006, St. Louis, MO, USA, pp. 496-498.
- [4] ACSYS: Polygon. Bedienungsanleitung. Fa. ACSYS, Moskau (2005).
- [5] Müller, W., Schmitz, V. and G. Schäfer: Reconstruction by the synthetic aperture focussing technique (SAFT). Nuclear Engineering and Design, 94 (1986) 3, pp. 393-404
- [6] Kaufmann, H., Huss, W., Krug, J. und S. Koch: Holzbau der Zukunft. Ganzheitliche Planungsstrategien. Konzeption und Umsetzung. Fraunhofer IRB Verlag (2009) 91 Seiten.
- [7] Bauforschungsprojekt am Fraunhofer IRB. Projektnummer: 20078034057. Titel: Erforschung und Entwicklung eines aus heimischen Hölzern hergestellten Verbundträgers mit hohen Festigkeitswerten: gezielte Kombination von Kanthölzern niedriger und mittlerer Sortierklassen mit Hochleistungs-Brettschichtholzlamellen. Beteiligte: DGfH, Universität Stuttgart.- FMPA, BBR. Laufzeit: 09.2007 - 08.2008. <http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/projekte.jsp?p=20078034057>
- [8] Bauforschungsprojekt am Fraunhofer IRB. Projektnummer: 20068033545. Titel: Numerische Berechnung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit von querzugverstärkten Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln. Beteiligte: Universität Karlsruhe, DIBt. Laufzeit: 06.2006 - 12.2007. <http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/projekte.jsp?p=20068033545>
- [9] Maack, S. und M. Krause: Ultraschall-Echoverfahren zur Integritätsprüfung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand. Abschlussbericht, Bauforschungsbericht F 2537 (2009) , 86 S., 72 Abb., 1 Tab., Fraunhofer IRB Verlag.
- [10] Bauforschungsprojekt am Fraunhofer IRB. Projektnummer: 20078034053. Titel: Analyse von Holzkonstruktionen im Bestand mit mobiler Röntgentechnik. Beteiligte: DGfH, LGA Nürnberg, BAM, BBR. Laufzeit: 10.2007 - 01.2009. <http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/projekte.jsp?p=20078034053>
- [11] Bauforschungsprojekt an der Universität Stuttgart, MPA. Förderkennzeichen: 15585 N. Titel: Qualitätsprüfung von Klebefugen in Brettschichtholz mittels Ultraschall. Förderer: BMWi, AiF, DGfH, ivTH. Laufzeit: 04.2008 - 03.2010. http://vz-188.bi.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/ivth/pdf/aif/AiF-15585N.pdf
- [12] Reinhardt, H.-W. et al.: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen. Bergmeister, K. und J.-D. Wörner (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten - Flächentragwerke, Berlin: Ernst & Sohn, 96 (2007) Kapitel V, Bd. 1, S. 479-595.
- [13] Frühwald, K., Peterson, L. und A. Hasenstab: Prüfverfahren zur Begutachtung der Materialeigenschaften von Holztragwerken. Fouad, N. (Hrsg.); Bauphysik Kalender 2012, Berlin: Ernst & Sohn, S.105-155.
- [14] MFPA Stuttgart: Qualitätsprüfung von Klebefugen in Brettschichtholz mittels Ultraschall, Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt, AiF-No. 15585 N, 09.12.2010.

- [15] Dill-Langer, G., Aicher, S. and W. Bernauer: Reflection Measurements at Timber Glue-Lines by Means of Ultrasound Shear Waves. NDT.net 4 (2006) 11, 6 pages.
- [16] Dill-Langer, G., Bernauer, W. and S. Aicher: Inspection of Glue-Lines of Glued-Laminated Timber by Means Of Ultrasonic testing. NDT.net 4 (2006) 11, 10 pages.
- [17] Aicher, S. und Dill-Langer, G.: Non-destructive detections of glue line defects in glued laminated timber. Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering, 2-5 June 2008, Miyazaki, Japan, Vol. 2/ , p. 234
- [18] Frühwald, K. und A. Hasenstab: Zerstörungsfreie Prüfung von Laubholz in Holzbauprodukten und im eingebauten Zustand. Fachtagung Bauwerksdiagnose 2010, Berlin, Poster 14.
- [19] Mayer, K.: Softwarepaket *inter-saft* zur bildgebenden Auswertung von Ultraschallechomessungen an Holzbauteilen, im Auftrag der BAM (2008).
- [20] 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>
- [21] Fa. Rinntech, Impulstomograph ARBOTOM®. <http://www.rinntech.de/content/view/7/35/>
- [22] Haaben, C., Sander, C. und F. Hapla: Untersuchung der Stammqualität verschiedener Laubholzarten mittels Schallimpuls-Tomographie. Holztechnologie 47 (2006) S. 5-12.
- [23] I.Ge.L Dr. Gustke GmbH, PICUS® Schalltomograph. <http://www.picus-online.de/picus/system/stomkomp.htm>
- [24] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Beuth Verlag Berlin, Heft 574 (Dissertation RWTH Aachen, 2008).
- [25] Bucur, V. and R.R. Archer: Elastic constants for wood by an ultrasonic method. Wood science and Technology 18 (1984) pp. 255-265.
- [26] Rose, J. L., Ditri, J. J., Huang, Y., Dandekar, D. P. and S.-C. Chou: One-Sided Ultrasonic Inspection Technique for the Elastic Constant Determination of Advanced Anisotropic Materials. Journal of Nondestructive Evaluation 10(4):159–166 (1991)
- [27] Bucur, V.: Acoustics of Wood, 2nd Edition. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany (2006).
- [28] Fellingner, P.: Ein Verfahren zur numerischen Lösung elastischer Wellenausbreitungsprobleme im Zeitbereich durch direkte Diskretisierung der elastodynamischen Grundgleichungen. Dissertation: University of Kassel, Germany (1991).
- [29] 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).
- [30] Chinta, P. K.: Ultrasonic Nondestructive Testing of Inhomogeneous Isotropic and Anisotropic Media: Modeling and Imaging. Dissertation: University of Kassel, Germany (2012).
- [31] Weiland, T.: Eine Methode zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen für sechskomponentige Felder auf diskreter Basis. AE^U, Bd. 31, Vol. 3 (1977), pp. 116-120.
- [32] Langenberg, K.-J. and R. Marklein: Transient elastic waves applied to nondestructive testing of transversely isotropic lossless materials: a coordinate-free approach. Special Issue in Honor of the 75th Birthday of A. T. de Hoop. Wave Motion, Vol. 41 (2005) No. 3, pp. 247-261.

- [33] Ganapathy, S., Wu, W.S. and B. Schmult: An analysis and design for a real-time system for nondestructive evaluation in the nuclear industry. *Ultrasonics* (1982) pp. 20-249.
- [34] Schmitz, V., Müller, W. and G. Schäfer: Practical Experiences with LSAFT. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Vol. 5 (1986) (Eds. D.O. Thompson, D.E. Chimenti) Plenum Press, New York.
- [35] Langenberg, K.-J.: Applied inverse problems for acoustic, electromagnetic and elastic waves. In: P.C. Sabatier (Ed.): *Basic methods of tomography and inverse problems*. Adam Hilger: Bristol (1987).
- [36] Mayer, K., Marklein, R., Langenberg, K.-J. and T. Kreutter: Three-dimensional imaging system based on Fourier transform synthetic aperture focusing technique. *Ultrasonics* Vol. 28 (1990) No. 4, pp. 241-255.
- [37] 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. In: *Proceedings of the 18th World Conference on Non-Destructive Testing*, Durban, South Africa, 16.-20.04.2012, CD-ROM, 10 pages.
- [38] Zimmer, A.: *Ultrasonic Imaging of Defects in Known Anisotropic and Inhomogeneous Structures with Fast Synthetic Aperture Methods*. Dissertation Universität Kassel, Kassel University Press (2008).
- [39] Mayer, K., Langenberg, K.-J., Krause, M., Milmann, B. and F. Mielentz: Characterization of Reflector Types by Phase-Sensitive Ultrasonic Data Processing and Imaging. *Journal of Nondestructive Evaluation* 1-3 (2008) 27, pp. 35-45.
- [40] 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.
- [41] Schickert, M., Krause, M. and W. Müller: Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. *Journal of Materials in Civil Engineering (JMCE)*, ASCE Vol. 15 (2003) 3, pp. 235-246.
- [42] 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.
- [43] Spies, M. and W. Jäger: Synthetic aperture focusing for defect reconstruction in anisotropic media. *Ultrasonics*, Vol. 41 (2003) pp. 125-131.
- [44] Hannemann, R.: *Modeling and Imaging of Elastodynamic Wave Fields in Inhomogeneous Anisotropic Media*. Dissertation, Berlin (2002).
- [45] Shlivinski, A. and K.-J. Langenberg: Defect imaging with elastic waves in inhomogeneous anisotropic materials with composite geometries. *Ultrasonics*, Vol. 46 (2007) 1, pp. 89-104.
- [46] Winter, S., Tue, N., Dehn, F. und A. Richter: *Optimierte Holz-Beton-Verbund-Bauteile aus Hochleistungsbetonen und flächigen Holzbauelementen aus Massivholz oder Hochleistungs-Holzwerkstoffen*. Reihe Holzbau Forschung. Fraunhofer IRB Verlag (2008).