

# Zerstörungsfreie Prüfung von Holzwerkstoffen mit luftgekoppeltem Ultraschall

Nondestructive Testing of Wood-based Materials with Air-coupled Ultrasound

vorgelegt von  
M. Sc  
Konrad Josef Vössing

an der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Stephan

Gutachterin: Prof. Dr. rer. nat. Sabine Kruschwitz

Gutachter: Prof. Dr. -Ing. Ulrich Schwarz

Gutachter: Priv. Doz. Dr. rer. nat. Ernst Niederleithinger

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 1. März 2022

Berlin 2022

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Kurzfassung .....	1
Abstract.....	2
1. Einführung .....	3
1.1 Hintergrund und Motivation.....	3
1.2 Fragestellung und Aufbau .....	7
2. Grundlagen.....	10
2.1 Werkstoff Holz.....	10
2.1.1 Morphologie.....	11
2.1.2 Physikalische Eigenschaften .....	13
2.1.3 Natürliche Inhomogenitäten.....	14
2.1.4 Schadensfälle.....	15
2.2 Ultraschalltechnik und deren Anwendung an Holz .....	18
2.2.1 Schall .....	18
2.2.2 Wellenarten .....	18
2.2.3 Schallgeschwindigkeit .....	20
2.2.4 Schallschwächung .....	21
2.2.5 Transmission und Reflektion.....	22
2.2.6 Luftgekoppelter Ultraschall .....	23
2.3 Messtechnik.....	25
2.3.1 Prüfköpfe .....	25
2.3.2 Experimenteller Aufbau .....	26
2.3.3 Bildgebung .....	27
2.3.4 Messunsicherheiten.....	29
3. Main investigations .....	30
3.1 State of the art .....	31
3.1.1 Introduction.....	32
3.1.2 Materials and methods .....	33
3.1.3 The most frequently applied methods .....	34

3.1.4	Combination of different methods.....	44
3.1.5	Conclusion and outlook.....	44
3.2	Air-coupled ultrasonic ferroelectret receiver with additional bias voltage .....	46
3.2.1	Introduction.....	47
3.2.2	Physical principles of ferroelectret receivers .....	48
3.2.3	Equipment and experiment .....	49
3.2.4	Results .....	51
3.2.5	Discussion and conclusion .....	56
3.3	Air-coupled ferroelectret ultrasonic transducers for nondestructive testing .....	58
3.3.1	Introduction.....	59
3.3.2	Manufacturer & technical details. ....	60
3.3.3	Experimental setup.....	61
3.3.4	Test sample preparation .....	62
3.3.5	Results and discussion.....	64
3.3.6	Conclusion.....	68
3.4	Imaging wood defects using air coupled ferroelectret ultrasonic transducers .....	69
3.4.1	Introduction.....	70
3.4.2	Materials and methods .....	72
3.4.3	Results and discussion.....	75
3.4.4	Conclusion.....	82
4.	Weiterführende Untersuchungen .....	84
4.1	Machbarkeit eines mobilen Messgeräts für Prüfungen in Reflektion.....	85
4.2	Holz-Strukturanalyse mit hochfrequentem Radar .....	89
4.3	Ortung von Fachwerk mit niederfrequentem Radar.....	92
4.4	Verifizierung einer Ultraschallmessung mit dem Bohrwiderstandsverfahren .....	97
5.	Zusammenfassung und Ausblick .....	100
5.1	Untersuchungen mit luftgekoppeltem Ultraschall.....	101
5.2	Untersuchungen mit Radar.....	105
5.3	Anwendungsbereiche in der Praxis und Grenzen des Verfahrens .....	106
5.4	Vorschläge für Verbesserungen und zukünftige Forschungsschwerpunkte.....	108
6.	Referenzen.....	111

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Aufbau eines Baumes im Querschnitt.....	11
Abbildung 2.2: Die drei anatomischen Grundrichtungen im Holz.....	12
Abbildung 2.3: Schematische Abbildung einer Holzzelle .....	13
Abbildung 2.4: Schadensbilder einiger Probekörper .....	16
Abbildung 2.5: Verschiedene Schallarten und Frequenzen. ....	18
Abbildung 2.6: Verschiedene Wellenformen in Festkörpern.....	19
Abbildung 2.7: Amplitudenverlauf des Ultraschalls bei trockenem Holz.....	22
Abbildung 2.8: Schematische Abbildung.....	23
Abbildung 2.9: Folie aus zellulärem Polypropylen .....	25
Abbildung 2.10: Aufbau der Apparatur.....	26
Abbildung 2.11: Experimenteller Aufbau des Scanners. ....	27
Abbildung 2.12: Darstellung von A-, B-, C- und D-Bildern an einem Holzbalken.....	28
Figure 3.1: Frequency range of the applied methods. ....	33
Figure 3.2: Principal setup of the spruce specimen .....	34
Figure 3.3: Principal setup for radiography measurements .....	35
Figure 3.4: Principal setup for stress wave measurements.....	37
Figure 3.5: Principal setup for ultrasonic measurements .....	38
Figure 3.6: Timber structure with mortise .....	40
Figure 3.7: Electrical resistivity measurement.....	42
Figure 3.8: Principal setup for the drilling resistance.....	43
Figure 3.9: Cellular polypropylene films .....	50
Figure 3.10: Receiver with a bias voltage module.....	51
Figure 3.11: Receiver signals with external bias voltage.....	52
Figure 3.12: Peak-to-peak receiver signals .....	53
Figure 3.13: The internal voltage $V_0$ .....	53
Figure 3.14: Results of a pulse-echo measurement .....	54
Figure 3.15: Results of a through-transmission inspection.....	55
Figure 3.16: Glued laminated timber .....	55
Figure 3.17: Cellular PP receiver for air coupled ultrasound.....	62
Figure 3.18: Comparison of piezoceramic and cellular PP transducers .....	64
Figure 3.19: Principal setup of the specimen Glulam 1.....	65
Figure 3.20: Sketch of the birch panel Plywood 1 .....	66
Figure 3.21: Varnished glued laminated timber Spruce 2 .....	67
Figure 3.22: Cellular PP receiver for air coupled ultrasonic measurements. ....	73
Figure 3.23: Test configuration of the multiplex specimen .....	74
Figure 3.24: Experimental setup in transmission (a) and reflection with foam roller (b). ....	75
Figure 3.25: Sketch of the multiplex specimen with artificial defects .....	76
Figure 3.26: Amplitude (a) and TOF (b) of the multiplex specimen .....	77
Figure 3.27: Sketch of the measurement setup in reflection.....	78
Figure 3.28: Signal contrast of the multiplex specimen.....	79
Figure 3.29: TOF (D-Scan) of the LVL specimen.....	80

Figure 3.30: Sketch of the MDF panel with artificial defects .....	81
Figure 3.31: Receiving waveforms for MDF specimen on a defect-free section.....	81
Figure 3.32: TOF of the MDF specimen at the three levels .....	82
Abbildung 4.1: Ultraschallmessgerät A1220 Monolith .....	85
Abbildung 4.2: Prototyp des Handscanners.....	86
Abbildung 4.3: A-Bild eines fehlerfreien Bereichs (a) und der Nut als Fehlstelle (b).....	87
Abbildung 4.4: Ausschnitt des Leimholz-Probekörpers mit Fehlstelle und Messaufbau.....	88
Abbildung 4.5: Messaufbau für hochfrequente Radaruntersuchung .....	89
Abbildung 4.6: Aufbau des Fichteprobekörpers.....	90
Abbildung 4.7: Hochfrequentes 80 GHz Radargram .....	91
Abbildung 4.8: Südwestansicht des Schlosses auf der Pfaueninsel. ....	92
Abbildung 4.9: Radarmessung an der Schlossfassade .....	93
Abbildung 4.10: Messfeld 1 und 2 an der Nordostfassade.....	94
Abbildung 4.11: Fachwerk hinter der geöffneten Fassade. ....	95
Abbildung 4.12: Ein mit Braurfäule zersetzter Balken und der dazugehörige C-Scan .....	97
Abbildung 4.13: Der zersetzte Balken mit Bohrmarkierungen.....	98

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Schallgeschwindigkeit in Holz .....	21
Table 3.1: Comparison of ferroelectret and piezoceramic ACU transducers.....	61
Table 3.2: Various test samples with information.....	63
Table 3.3: Parameters of the three test samples.....	73

## Abkürzungsverzeichnis

A-Bild	Intensität über die Laufzeit
ACU	Air-coupled ultrasound
A/D	Analog/ Digital
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
B-Bild	Laufzeit über den Messweg
C-Bild	Amplitude als Tiefenschnitt
D-Bild	Laufzeit als Tiefenschnitt
dB	Dezibel
EMFi	Electro-Mechanical Film
FHR	Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik
Gluelam	Glued laminated lumber
LVL	Laminated veneer lumber
MDF-Platte	Mitteldichte Faserplatte
NDT	Nondestructive testing
OSB	Oriented strand board
PP	Polypropylen
SAFT	Synthetic aperture focusing technique
SNR	Signal to-noise ratio
TOF	Time of flight
US	Ultraschall
WBM	Wood-based material
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

## Kurzfassung

Die Nachfrage nach geeigneten Prüfverfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Holzbauteilen steigt stetig. Ausschlaggebend für den erfolgreichen Einsatz einer Prüftechnik ist die Entwicklung eines Verfahrens, mit dem der Zustand der Holzwerkstoffe abgebildet werden kann. Große Flächen sollten schnell und kostengünstig geprüft und bewertet werden können. Verfahren, die den Kontakt zur Oberfläche durch Druck, Wasser oder Gel herstellen, erweisen sich in der Praxis als ungeeignet, da sie das Holz beschädigen und Unebenheiten ein sauberes Ankoppeln erschweren. Größeres Potenzial bieten dagegen berührungslose Verfahren, bei denen die Verwendung luftgekoppelter Prüfköpfe, die über das zu untersuchende Holzbauteil geführt werden, Prüfergebnisse liefern können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein bildgebendes Prüfverfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Holzwerkstoffen entwickelt, bei dem das berührungslose Luftultraschallverfahren im Mittelpunkt steht. Ziel der Prüfung ist die Abbildung unterschiedlicher Fehlstellen, zum Beispiel Delaminationen, Fäule oder Risse. Die Messungen werden dabei sowohl in Durchschallung als auch in Reflektion durchgeführt. In Durchschallungsanordnung lassen sich Delaminationen und Minderdicken, aber auch Risse und Fäule bis in einer Tiefe von 200 mm abbilden. In Reflektionsanordnung können sowohl Delaminationen als auch Minderdicken und deren Tiefenlage in bis zu 40 mm dicken Plattenwerkstoffen detektiert werden. Für die Messung in Reflektion wurde eine neue Abschirmvorrichtung entwickelt, die ein direktes Übersprechen der Wandler effektiv verhindert. Marktübliche Messsysteme sind bei einigen Anwendungsfällen nach wie vor nicht zuverlässig genug oder haben eine unzureichende Eindringtiefe. Neuartige ferroelektrische Prüfköpfe aus zellulärem Polypropylen mit Frequenzen von 90 kHz bis 250 kHz und einer höheren Leistungsfähigkeit können diese Lücke schließen und die gängigsten Anwendungsbereiche abdecken.

Als Trägersystem der Prüfköpfe dient ein stationärer Scanner oder ein neukonzipiertes mobiles Handmessgerät. So ermöglicht das entwickelte Verfahren ein schnelles, kontaktloses und kostengünstiges Überprüfen von Holzwerkstoffen bei einer hohen Eindringtiefe aufgrund einer vorteilhaften Impedanz für die Transmission von Ultraschallwellen. Für die Darstellung der Messergebnisse wurde sowohl die Laufzeit als auch die Amplitude des Signals ausgewertet. Die Ergebnisse des Ultraschallverfahrens wurden mit denen des Radar- und Röntgenverfahrens abgeglichen oder bei Bedarf mit dem Bohrwiderstandsverfahren verifiziert. Diese Überprüfung sowie der Vergleich mit anderen berührungslosen Prüfverfahren zeigen, dass Luftultraschall eine vielversprechende Technik ist, die für die moderne Qualitätssicherung geeignet und im Vergleich mit anderen zerstörungsfreien Verfahren im Hinblick auf Messgeschwindigkeit und Genauigkeit konkurrenzfähig ist.



## Abstract

The demand for suitable nondestructive testing methods of wood components is increasing. Decisive for the use of the technology is the development of a process with which the condition of the wood-based materials can be imaged. The test must be able to check and evaluate large areas quickly and inexpensively. Procedures that contact the surface by pressure, water or gel are not practical because they can damage the wood and bumps make the coupling difficult. There is great potential in non-contact methods. By using air-coupled transducers, which are moved over the wood specimen, this goal could be achieved.

Within the scope of this work, an imaging test procedure was developed to test wood-based materials nondestructively. Air coupled ultrasound is a focal point of the work. The goal of this technique is the imaging of various defects, such as delamination, rot or cracks. The measurements are carried out both in transmission and in reflection on the components. In transmission, delamination and reduced thicknesses but also cracks and rot can be imaged up to a depth of 200 mm. With the reflection technique delamination and reduced thicknesses and their depth can be detected in up to 40 mm thick plate materials. For the measurement in reflection, a new shielding was developed, which effectively prevents direct crosstalk of the transducers. Commercially available measuring systems are still not reliable enough in some applications or have an insufficient penetration depth. Novel ferroelectric transducers made of cellular polypropylene with frequencies from 90 kHz to 250 kHz and a higher performance close this gap.

The carrier system is a stationary scanner or a newly developed mobile handheld device. The method allows a fast, contactless, and cost-effective testing of wood-based materials at a high penetration depth due to a favorable acoustic impedance for the transmission of ultrasonic waves. For the representation of the measurement results both the time of flight and the amplitude of the signal are evaluated. The ultrasound procedure was compared with the radar and X-ray method or verified with the drilling resistance if necessary. The results and the comparison with other non-contact test methods show that air-coupled ultrasound is a promising technique suitable for modern quality assurance and competitive with other nondestructive methods in respect of velocity and accuracy.

# 1. Einführung

Zu Beginn der Einführung werden zunächst der Hintergrund und die Motivation der Forschungsarbeit beleuchtet, um im zweiten Teil der Einführung den Aufbau der Arbeit zu beschreiben und Forschungsfragen zu definieren.

## 1.1 Hintergrund und Motivation

Befördert unter anderem durch den Klimawandel und die Bemühungen um einen nachhaltigeren Umgang mit den Ressourcen, hat das Bauen mit Holz in den letzten Jahren eine Renaissance erlebt. Die Klimaschutzdebatte führt dazu, dass Holz als nachwachsender Rohstoff eine wichtige Rolle unter den Baustoffen zugemessen wird. Immer häufiger werden einzelne Bauteile durch Holzwerkstoffe ersetzt, oder es wird das gesamte Objekt in Holz gefertigt. Dabei wird zunehmend auf weiterverarbeitete Holzwerkstoffe zurückgegriffen. Im Gegensatz zu gewachsenem Holz zeichnen sich diese Werkstoffe durch einen homogeneren Aufbau aus. Beispielsweise werden bei Furnierschichtholz dünne Holzlagen miteinander verklebt, wodurch Fehlstellen wie Astlöcher zufällig über das gesamte Bauteil verteilt werden und nicht mehr konzentriert an einer Stelle auftreten. Die natürlichen Holzfehler haben dementsprechend einen geringeren Einfluss auf die Festigkeit des Gesamtprodukts. Um die Verklebung und andere Fehlstellen zu überwachen, werden effiziente Prüfverfahren benötigt [Lossau 2019; Niemz 1993].

Auch 12 Jahre nach dem Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall, verursacht durch falsch verklebte Holzträger, ist das Thema effektiver Prüftechniken immer noch aktuell und verlangt nach optimierten Messverfahren. Viele Fachartikel zum Thema *Zerstörungsfreie Prüfung von Holzbauteilen* sind seitdem erschienen [z.B. Sanabria et al. 2015; Fang et al. 2017; White and Ross 2014].

Insgesamt können bei den Testverfahren drei Varianten unterschieden werden: eine zerstörende, eine teilzerstörende und eine zerstörungsfreie Prüfung (ZfP). Bei der Auswahl eines geeigneten Prüfverfahrens werden zerstörungsfreie Prüfungen bevorzugt, da es bei diesen Verfahren zu keiner Schädigung der Holzsubstanz kommt. Die beiden genannten Prüfverfahren gliedern sich nochmals in volumenorientierte Messmethoden, wie zum Beispiel die Radar- und die Ultraschallprüfung, und lokale Messverfahren, wie die Bohrwiderstandsmessung und die Bohrkernentnahme. Erstere beinhalten das Scannen vollständiger Flächen, wohingegen letztere nur Informationen zu einem Punkt liefern.

Im Gegensatz zu teilzerstörenden Prüfverfahren, die meist auf mechanischen Tests beruhen, nutzt die ZfP üblicherweise elastische oder elektromagnetische Wellen. Elastische Wellen werden beispielsweise in der Ultraschalltechnik verwendet, während elektromagnetische Wellen beim Radar zum Einsatz kommen. Um Abbildungen zu erzeugen, wird entweder der Sender über das Bauteil oder das Bauteil unter dem Sender hergeführt, während gleichzeitig die Signale aufgezeichnet werden. Die Wahl eines geeigneten Prüfverfahrens ist bis zu einem bestimmten Grad abhängig von der gewünschten Auflösung: Je kürzer die Wellenlänge, desto

größer ist die Auflösung [Bucur 2003]. Aber auch der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten beeinflusst die Auflösung. Da Eindringtiefe und Auflösung sich gegenseitig bedingen, ist jedes Messverfahren ein Kompromiss und abhängig vom Probekörper und Holzfehler. Durch den Einsatz unterschiedlicher Prüffrequenzen und Verfahren kann die Zuverlässigkeit bei der Erkennung von charakteristischen Eigenschaften des Holzes gesteigert werden.

Holz ist ein heterogener, anisotroper Werkstoff mit unterschiedlichen strukturellen Eigenschaften im Querschnitt und in den drei anatomischen Grundrichtungen (longitudinal, radial, tangential) [Fengel and Wegener 1983]. Darüber hinaus ist Holz biologisch abbaubar und hygroskopisch. Daher machen Änderungen des Wassergehalts, holzerstörende Pilze und Insekten eine besondere Überwachung und einen speziellen Schutz erforderlich.

Nun erschweren aber Anisotropie und Heterogenität eine standardisierte Qualitätskontrolle von Holz. Beispielsweise besitzt Holz in seinen anatomischen Grundrichtungen unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten, was bei Untersuchungen mit Ultraschall berücksichtigt werden muss. Auch natürliche Wuchsmerkmale wie Jahresringe, Porenverteilung und Astigkeit, aber auch der Feuchtegehalt haben Einfluss auf die Messergebnisse und können sich gegenseitig überlagern [Burmester 1968], so dass der Einfluss einzelner Merkmale nur noch schwer unterschieden werden kann. Häufig wird deshalb eine Multisensorik (Kombination mehrerer Verfahren) eingesetzt, um verschiedene Parameter abbilden zu können. Eine weitere Herausforderung ist die große Schwankungsbreite der Materialparameter bei ein und derselben Holzart. Beispielsweise kann die Darrdichte (null Prozent Holzfeuchte) der Kiefer aufgrund von wuchs- und standortbedingten Unterschieden zwischen  $300 \text{ kg/m}^3$  und  $860 \text{ kg/m}^3$  schwanken [Knigge and Schulz 1966]. Auch die Werte von E-Modul und Festigkeit können innerhalb einer Holzart stark variieren [Kollmann 1951].

Zwar können mittels visueller Kontrolle durch erfahrene Gutachter Holzbauteile schnell auf äußerliche Fehler untersucht werden. Viele Fehler, die einen großen Einfluss auf die Produkteigenschaft haben, liegen jedoch innerhalb der Bauteile und können von außen nicht erkannt werden. Es kann sich hierbei um Fäule, Risse, Astlöcher oder Delaminationen handeln, die den Zustand eines Bauteils so stark verändern, dass die erforderliche Funktionsfähigkeit nicht mehr gewährleistet ist. Auf die Detektion solcher Mängel im Bauteilinneren mittels ZfP ist vorliegende Forschungsarbeit ausgerichtet.

Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Qualitätsbewertung von Holz und Holzprodukten werden schon vielerorts eingesetzt [Niemz and Mannes 2012]. Hauptanwendungsbereiche sind die Überwachung von Bäumen und verbautem Holz im Bestand und die Fertigungskontrolle in der Holzverarbeitenden Industrie. Obwohl ZfP-Verfahren vielerorts bereits eingesetzt werden, besteht weiterhin Forschungsbedarf, um Prüfverfahren zu optimieren und neue Anwendungsfelder, wie zum Beispiel die Ultraschallprüfung von dicken Holzwerkstoffen, zu erschließen.

Im verbauten Zustand ist der Werkstoff Holz schädigenden Einflüssen durch den Nutzer und die Umwelt ausgesetzt. Da immer häufiger verbaute Holzteile auch in sicherheitsrelevanten Bereichen eingesetzt werden, nimmt die Notwendigkeit der Überwachung ihres Zustandes zu. Geprüft wird – wie auch bei lebenden Bäumen – ihre Standsicherheit. Häufig eingesetzte Verfahren in der ZfP von Holzbauteilen sind beispielsweise die Feuchtemessung mittels elektrischer Widerstandsmessung oder die Festigkeitssortierung durch Messen der Eigenfrequenz [Ross and Pellerin 1994]. Für dieses Anwendungsgebiet gibt es außerdem einige wenige kommerzielle Geräte, deren Fehlerortung durch Ultraschall oder Radiographie geschieht. Häufig ist zur Verifizierung der Ergebnisse eine Kombination verschiedener Prüfverfahren notwendig. So können beispielsweise die Ergebnisse flächiger Ultraschallmessungen mit dem Bohrwiderstandsverfahren abgeglichen werden, um eventuelle Fehldiagnosen auszuschließen.

Im Herstellungsprozess von Holzwerkstoffen ist bei der Fertigungskontrolle neben der Schnittholzsortierung nach Qualitäts- und Festigkeitsklassen auch die Fehlererkennung von großer Bedeutung. Eine fortschreitende Automatisierung in der Produktion lässt den Wunsch nach zusätzlichen und genaueren zerstörungsfreien Prüfverfahren kontinuierlich steigen [Solbrig et al. 2014]. Die Detektion von Holz- und Produktionsfehlern in der Industrie ist aufwendig, und die aufgedeckten Mängel sind kostenintensiv zu beheben.

Denn um Produktionsfehler rechtzeitig zu erkennen, muss der Fertigungsprozess in der Holzwerkstoffindustrie permanent überwacht und durch zerstörungsfreie Prüfung die Qualität der Produkte sichergestellt werden. Die meisten Holzwerkstoffe werden zunächst als Endlosplatte gefertigt. Im Allgemeinen wird das Holz dafür gegebenenfalls zerkleinert, getrocknet und mit Leim durchmischt. Dann wird es auf die Formstraße aufgebracht, auf der die Masse unter großer Hitze zu einer Endlosplatte verpresst wird. Bevor diese zu einzelnen Platten zugeschnitten wird, wird sie berührungslos mit Geschwindigkeiten von bis zu 5 m/s gescannt. Die industriell eingesetzten Messsysteme in der Holzwerkstoffindustrie müssen auch unter widrigen Bedingungen zuverlässig arbeiten, wenn zum Beispiel zusätzlich zu einer hohen Staubbelastung an der zu messenden Platte Temperaturen von ca. 100° C auftreten [Dunky and Niemz 2013].

Für die beschriebenen Aufgaben sind schon verschiedene Anlagen im Einsatz. Handelsübliche Geräte arbeiten häufig mit Ultraschall im Durchschallungsverfahren. Das bedeutet, dass ein Ultraschallimpuls durch die zu prüfende Platte gesendet und seine Signale auf der anderen Plattenseite von einem Empfänger registriert werden. Anhand der Laufzeit und der Amplitude des Signals können Rückschlüsse auf Zustand und Eigenschaft der Platte gezogen werden. Bei dieser Technik ist allerdings eine fehlerfreie Erkennung von Defekten bei besonders dicken und schweren Platten nicht gewährleistet. Massive Bauteile von über 100 mm Dicke dämpfen das Ultraschallsignal so stark, dass Fehlstellen nicht mehr genau genug detektiert werden können. Auch sehr schwere oder sehr leichte Holzwerkstoffe erschweren eine zuverlässige Prüfung, da sie das Signal entweder dämpfen oder so stark streuen, dass der Empfänger kein klares Signal mehr erhält. ZfP-Methoden werden in der

Holzwerkstoffindustrie nicht nur zum Detektieren von Holzfehlern eingesetzt, sondern beispielsweise auch zur Flächengewichtsmessung, zur Dickenmessung oder zur Fremdkörpererkennung [Solbrig et al. 2014]. Diese Anlagen nutzen meistens Röntgentechnik mit einer hohen Eindringtiefe und Auflösung, die allerdings mit hohen Sicherheitsauflagen verbunden sind [Hilbers et al. 2012a].

Nachdem in der industriellen Ultraschalltechnik zuletzt Punktkontaktprüfköpfe für Aufsehen gesorgt haben, geht der Trend mittlerweile zu luftgekoppelten Ultraschallprüfköpfen (engl. air-coupled ultrasonic (ACU) transducers) [Gräfe 2008]. Beiden Systemen ist gemein, dass keine Verwendung eines Koppelmediums notwendig ist, was ein automatisiertes Scannen ermöglicht. So können auch große Flächen mit geringem Mehraufwand überprüft werden. Der große Vorteil des Luftultraschalls liegt darin, dass durch das kontaktlose Scannen die Messgeschwindigkeit erhöht werden kann und andererseits auch empfindliche Oberflächen und Bauteile zerstörungsfrei untersucht werden können. Deshalb lassen sich ultraschallbasierte Prüfverfahren unkompliziert in die Produktionsabläufe integrieren [Döring 2011]. Bisher war allerdings die Messgeschwindigkeit von ACU-Prüfköpfen durch die Wiederholfrequenz des Pulses begrenzt. Durch neu entwickelte luftgekoppelte Prüfköpfe werden bereits Messgeschwindigkeiten von ca. 50 bis 100 Messpunkten/s möglich. Dies bedeutet eine 100- bis 250-fach höhere Messgeschwindigkeit gegenüber bisherigen Ultraschallecho-Systemen [Gräfe 2008].

Bestehen diese ACU-Prüfköpfe – inzwischen kommerziell erhältlich – meist aus piezokeramischen Materialien, so wurden in den letzten Jahren an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) neuartige, ferroelektrische Prüfköpfe entwickelt [Gaal et al. 2012]. Diese Prüfköpfe wandeln einen elektrischen Impuls mittels zellulären Polypropylens (PP) in ein akustisches Signal um. Diese leistungsstarken Prüfköpfe eröffnen neue Anwendungsfelder und Prüfkopfanordnungen. Damit können auch dickere Werkstoffe durchschallt und Messungen in Reflektion durchgeführt werden.

Der in den letzten Jahren erzielte Fortschritt in der Luftultraschall-Prüfkopftechnik sowie das seit langem anvisierte Ziel, ein schnelles und kostengünstiges Ultraschallmesssystem für große, teilweise nur einseitig zugängliche Holzwerkstoffe zu entwickeln, waren letztendlich die Motivation für die vorliegende Forschungsarbeit.

Übergeordnete Zielsetzung der Arbeit ist die zerstörungsfreie Prüfung von Holzwerkstoffen und die Entwicklung eines bildgebenden Prüfverfahrens zur Detektion von Holzfehlern, das sowohl im Herstellungsprozess von Holzwerkstoffen als auch bei der Bestandsprüfung zum Einsatz kommen soll. Ein besonderes Augenmerk galt dabei dem Brett- und Furnierschichtholz, das eine wachsende Bedeutung im Bauwesen hat [Lossau 2019]. Die bestehenden ZfP-Verfahren werden als zu ungenau und wenig belastbar eingeschätzt. Insbesondere die Messung in Reflektion muss für einen Praxiseinsatz verbessert werden, damit die Sicherheit von Holzbauteilen zuverlässig diagnostiziert werden kann. Nur so kann der Markt an Holzwerkstoffen, die in sicherheitsrelevanten Bereichen zum Einsatz kommen, nachhaltig wachsen.

Die Herausforderung dieser Forschungsarbeit bestand deshalb darin, eine Methode zu entwickeln, die Fehler lokalisiert, ohne das Bauteil zu beschädigen, vor allem ohne seine Festigkeit zu verringern und dazu eine, die sich in den Herstellungsprozess integrieren lässt.

## 1.2 Fragestellung und Aufbau

Kern der Arbeit ist die Frage, inwieweit sich luftgekoppelter Ultraschall für die zerstörungsfreie Prüfung von Holz eignet. Aus dieser Fragestellung resultieren weitere:

- Wie ist der aktuelle Stand der Technik und wo gibt es noch Forschungsbedarf für die ZfP von Holz?
- Welche Schädigungen und Mängel im Holz sind in der Praxis relevant?
- Welche Besonderheiten sind bei der Prüfung von Holz zu beachten?
- Lassen sich die in anderen Forschungsbereichen erzielten Ergebnisse auf Holz übertragen?
- Welche Verfahren eignen sich für die Abbildung innenliegender Holzfehler?
- Welche Möglichkeiten und Grenzen bietet das Luftultraschall-Verfahren?
- Welche Herausforderungen behindern einen Einsatz in Industrie und Bauwesen?
- Ist eine Kombination mit anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren sinnvoll?

Diese Fragen werden in insgesamt vier Veröffentlichungen (A-D) beantwortet. Zusätzlich werden weiterführende Untersuchungen zur Vervollständigung der Thematik dargestellt. Die vier Veröffentlichungen haben folgenden Inhalt:

A. *Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber (Kapitel 3.1)*

In diesem Kapitel wird der Stand der ZfP-Technik dargestellt und ein Überblick über alle relevanten ZfP-Verfahren anhand von Beispielmessungen an einem Vergleichsprobekörper gegeben. Um das Potenzial der einzelnen Methoden abzuwägen, werden die Prüfverfahren analysiert und miteinander verglichen. Teilerstörende Verfahren wie Bohrwiderstand und elektrischer Widerstand werden genauso untersucht wie ZfP-Verfahren mit Ultraschall, Radar und Radiographie, jeweils mit dem Ziel, aussichtsreiche Verfahren im Folgenden genau zu untersuchen und weiter zu verbessern.

B. *Air-coupled ultrasonic ferroelectret receiver with additional bias voltage (Kapitel 3.2)*

Diese Abhandlung beschreibt die Funktionsweise von ferroelektrischen Prüfköpfen aus zellulärem Polypropylen. Der Empfänger wird mit einem neu entwickelten

Hochspannungsvormodul betrieben, um das Empfangssignal zusätzlich zu verstärken. Mit einer Strukturanalyse eines Holzprobekörpers aus Eichenleimholz kann das Potenzial der Technik gezeigt werden. Es zeigt sich, dass Merkmale im Probekörper wie z. B. Leimfugen, Astlöcher und Insektenbefall gut erkennbar sind.

C. *Air-coupled ferroelectric ultrasonic transducers for nondestructive testing of wood-based materials (Kapitel 3.3)*

Hier geht es um die Untersuchung von Probekörpern mit Ultraschallwandlern aus zellulärem Polypropylen. Hierfür werden Fehlstellen künstlich erzeugt, die realen Fehlstellen gleichen. Es werden piezokeramische Wandler mit zellulären PP Wandlern verglichen und eine optimale Prüffrequenz ermittelt. Es zeigt sich, dass Delamination, Holzfäule und Hohlräume in den Probekörpern zweifelsfrei detektiert werden können.

D. *Imaging wood defects using air coupled ferroelectric ultrasonic transducers in reflection mode (Kapitel 3.4)*

In diesem Kapitel werden Messungen mit luftgekoppeltem Ultraschall einerseits in Durchschallung und andererseits in Reflektion vorgenommen. Die Messungen in Reflektion werden mit einer neuartigen Schallabschirmung durchgeführt, um die Fehlererkennung zu präzisieren. Die vergleichenden Untersuchungen ergeben, dass eine Messung in Reflektion zwar möglich ist, aber nur um den Preis einer geringeren Genauigkeit und Eindringtiefe. Dafür können Messungen in Reflektion auch bei einseitiger Bauteiluntersuchung eingesetzt werden und Angaben zur Tiefe der Fehlstellen innerhalb des Probekörpers liefern.

Bei den weiterführenden Untersuchungen geht es darum das Ultraschallverfahren für die Praxisanwendung vorzubereiten, mögliche Anwendungsbereiche zu benennen und die Ergebnisse mit anderen Prüfverfahren zu vergleichen.

Im ersten Abschnitt der weiterführenden Untersuchungen wurde ein mobiles Messgerät entwickelt (Kapitel 4.1), das für eine einseitige Prüfung von Holzbauteilen geeignet ist. Zusätzlich werden Messungen beschrieben, die bei der berührungslosen Strukturanalyse von Holzbauteilen zum Einsatz kommen. Ferner wird ein Verfahren beschrieben, das hochfrequente elektromagnetische Wellen zur Ortung von Fehlstellen nutzt (Kapitel 4.2). Ein am Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FHR) entwickelter Radarchip ermöglicht die hochgenaue Analyse von Holzbauteilen. Sodann werden Versuche mit niederfrequenten Radarantennen, die das hinter einer vorgehangenen Fassade liegende Fachwerk orten und auf diese Weise weitere Sanierungsmaßnahmen einleiten können, analysiert (Kapitel 4.3). Der Vergleich einer Ultraschallmessung mit dem Bohrwiderstandsverfahren schließlich dient dazu die Messergebnisse zu verifizieren (Kapitel 4.4).

Abschließend werden die Ergebnisse zusammengeführt und bewertet, um daraus Chancen und Grenzen der untersuchten Verfahren für die praktische Anwendung darstellen zu können.



## 2. Grundlagen

Ultraschall ist bei der ZfP von Holz weit verbreitet und findet durch die fortlaufende Entwicklung aussagekräftiger Prüfmethode immer neue Anwendungsfelder. In diesem Kapitel werden zuerst die Eigenschaften des Materials Holz in den Blick genommen sowie dessen potenzielle Fehlstellen erläutert, die mit Ultraschall detektiert und abgebildet werden können. Die Kenntnis von Aufbau und Struktur des Holzes ist entscheidend für die Auswahl geeigneter Messverfahren und die Bewertung der Ergebnisse. Nachfolgend wird die Ultraschalltechnik im Allgemeinen und die dazugehörige Messtechnik im Speziellen erläutert.

### 2.1 Werkstoff Holz

Holz ist ein jahrtausendealter Baustoff, der nahezu auf der gesamten Welt zur Hand und leicht zu verarbeiten ist. Er verfügt über eine hohe Zugfestigkeit, die auf das Gewicht bezogen höher sein kann als die von gewöhnlichem Stahl. Holzarten, die häufig als Baustoff genutzt werden, sind Fichte, Tanne und Kiefer bei den Nadelhölzern und bei den Laubhölzern Eiche, Birke und Buche. In verbautem Zustand sollten die Holzwerkstoffe eine Holzfeuchte von ca. 15 % besitzen, da sich in diesem Bereich die Ausgleichsfeuchte einpendelt, sodass nachträgliches Quellen und Schwinden vermieden werden. Im Folgenden werden einige Holzwerkstoffe beschrieben, die als Balken oder Platten aus der Fertigung hervorgehen:

- Massivholz - aus dem Stamm geschnittene Balken mit allen natürlichen Fehlstellen  
  
Dieses Holz wird häufig im Dachstuhl oder als Deckenbalken von Gebäuden eingesetzt.
- Konstruktionsvollholz - Balken, bei denen fehlerhafte Stellen herausgeschnitten werden können  
  
Mit einer Keilzinkenverbindung können Teilstücke auf die gewünschte Länge verklebt und somit die Herstellung von besonders hochwertigen Balken mit unbegrenzter Länge ermöglicht werden.
- Brettsperrholz - einzelne drei-, fünf-, oder siebenlagig übereinander verklebte Bretter  
  
So können beliebige Querschnitte und Längen realisiert werden, die häufig in Fertighäusern als komplette Wand- und Deckenelemente zum Einsatz kommen.
- Furnierschichtholz - dünne zu Balken verklebte Furniere  
  
Hier wird durch Homogenisierung des Materials eine außerordentlich hohe Festigkeit erreicht.
- Multiplex - hochfester Plattenwerkstoff, bei dem einzelne Furnierlagen kreuzweise miteinander verklebt werden

Dieser Plattenwerkstoff findet Anwendung im Möbelbau und verfügt über eine hohe Maßhaltigkeit.

- Spanplatte - zu Platten verpresste Holzspäne, die in ihrer Dichte stark variieren können

Mit einer zusätzlichen Melaminharzbeschichtung findet diese Platte Verwendung im Möbelbau und als Küchenarbeitsplatten. Dabei sind innenliegende Späne größer und haben eine geringere Dichte als die Späne an der Oberfläche der Platte.

- Mitteldichte Faserplatte - Werkstoff, bei dem Holzfasern mit einer Dichte  $\leq 650 \text{ kg/m}^3$  zu einer Platte verpresst werden

Das Material ist eine günstige Alternative zu Vollholz im Möbelbau.

### 2.1.1 Morphologie

Aufbau und Struktur von Holz sind einzigartig und variieren überdies in Abhängigkeit von der Holzart. Abbildung 2.1 zeigt die verschiedenen Bestandteile in einem Holzstamm: Das Kambium befindet sich zwischen Borke und Splintholz und ist die Wachstumsschicht des Baumes. Nach außen produziert es die Rinde, die sich in die äußere Borke und den innen liegenden Bast unterteilt. Innerhalb des Kambiums entsteht das Holz. Je nach Jahreszeit bilden sich hier Früh- oder Spätholz, sichtbar anhand der Jahresringe. Durch Zählen der Jahrringe kann man das Alter des Baumes bestimmen. Im Sommer entsteht das Frühholz mit weiten Gefäßen und dünnwandigen Zellen, die die Holzfasern bilden und längs des Stammes angeordnet sind.

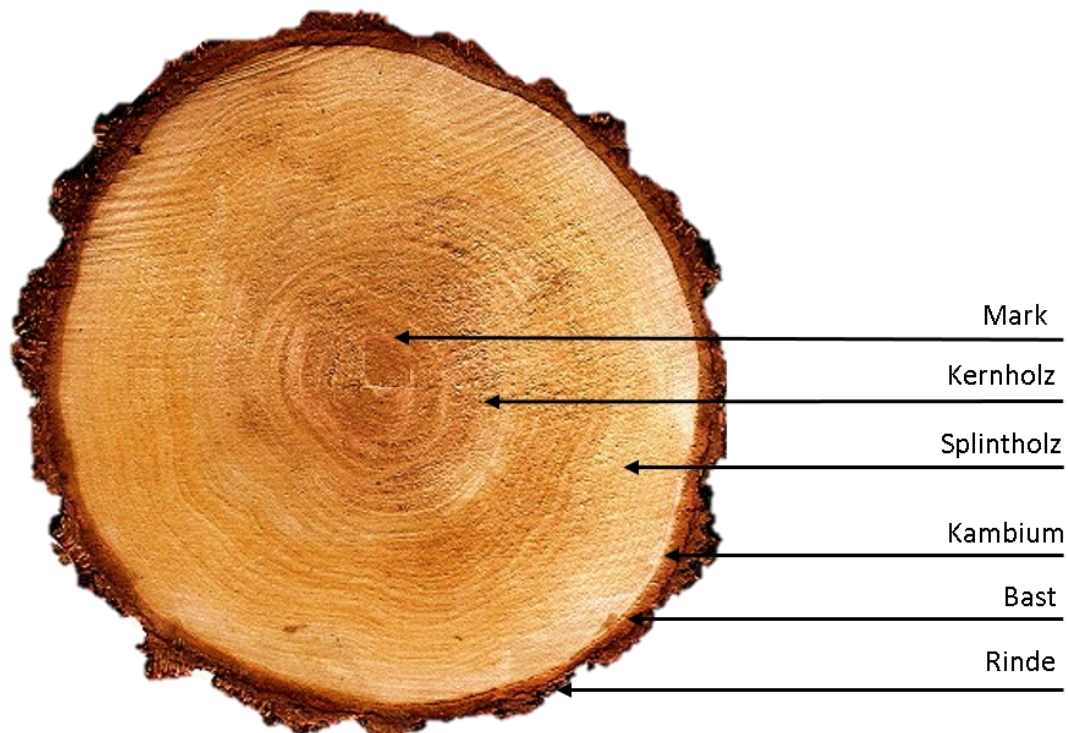


Abbildung 2.1: Aufbau eines Baumes im Querschnitt.

Zum Ende der Vegetationszeit wird das Spätholz gebildet, das durch seine dickwandigen Zellen fester ist. Das Holz gliedert sich in das wasser- und nährstoffführende Splintholz und das innenliegende Kernholz. Das Kernholz ist bereits abgestorben, zu seinem Schutz werden verschiedene Inhaltsstoffe eingelagert, die das Holz schützen sollen und ihm auch häufig eine charakteristische Farbe verleihen. Die Inhaltsstoffe führen auch dazu, dass das Kernholz, beispielsweise bei Kiefer und Eiche, eine größere Dauerhaftigkeit aufweist als Splintholz [Fengel and Wegener 1983].

Durch den geschilderten Aufbau und die Abhängigkeit der Holzstruktur von äußeren Einflüssen wird das stark anisotrope Materialverhalten von Holz deutlich. Um die richtungsabhängigen Eigenschaften zu definieren, werden drei anatomische Grundrichtungen unterschieden, die in Abbildung 2.2 dargestellt werden:

Die Ausrichtung längs der Faser wird als longitudinal bezeichnet, da sich ein Großteil der Holzzellen parallel zum Stamm, faserförmig nebeneinander liegend, anordnet. Senkrecht zu den Jahresringen wird die Ausrichtung als radial und entlang der Jahresringe als tangential bezeichnet.

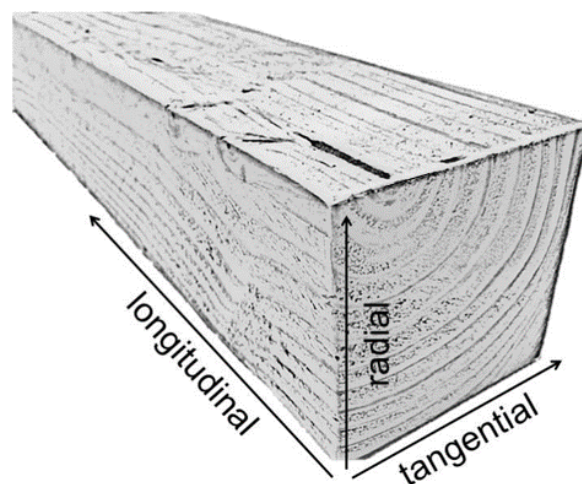


Abbildung 2.2: Die drei anatomischen Grundrichtungen im Holz.

Neben den mechanischen und strukturellen Eigenschaften variiert auch die chemische Zusammensetzung je nach Holzart enorm. Grundsätzlich besteht Holz aus ca. 50 % Kohlenstoff, 6 % Wasserstoff und über 43 % Sauerstoff. Der Rest setzt sich aus Stickstoff und mineralischen Bestandteilen (Asche) zusammen [Kollmann 1951].

Hauptbestandteil des Holzes ist die Zellulose mit einem Anteil von ca. 50 %. Sie bildet den kristallinen Teil und ist das Gerüst des Holzes, bestehend aus kettenartigen Kohlenstoffhydraten. Ein weiterer Bestandteil ist die Hemizellulose mit ca. 20 %, eine Gerüstsubstanz ohne besondere Struktur, die von Holzschädlingen gerne zuerst zersetzt wird. Der dritte große Bestandteil ist das Lignin mit ca. 30 %. Es gehört zum amorphen Teil des Holzes, wird als Füllstoff zwischen den Fasern eingelagert und verleiht dem Holz seine

Festigkeit. Der Rest der Holzbestandteile entfällt auf weitere Inhaltstoffe wie beispielsweise Harze [Kollmann 1951].

Holzwerkstoffe zeichnen sich dadurch aus, dass es bei zunehmender Zerkleinerung des Holzes zu einer Homogenisierung der Eigenschaften kommt. Diese Eigenschaften werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Indem die Stoffkomponenten sowie ihre Gestalt und Anordnung variiert werden, verändert sich die Werkstoffeigenschaft der jeweiligen Produkte. Beispielsweise kann durch spezielle Bindemittel die Witterungsbeständigkeit von Spanplatten und Faserplatten an die Umgebungseinflüsse angepasst werden [Niemz 1993].

Durch die Zerkleinerung des Holzes wird der Einfluss von Holzfehlern verringert, sodass im Vergleich zum unverarbeiteten Holz ein Vergütungseffekt mit verbesserten Eigenschaften erzielt wird. Dieser Vergütungseffekt beinhaltet je nach Holzwerkstoff entweder eine höhere Festigkeit und Dauerhaftigkeit oder ein verringertes Quell- und Schwindverhalten. Eine höhere Festigkeit entsteht insbesondere bei Konstruktionsvollholz und Furnierschichtholz. Das Quell- und Schwindverhalten wird bei allen kreuzweise verleimten Holzwerkstoffen, wie z.B. Brettsperrholz und Multiplex gehemmt. Bei diesen beiden Holzwerkstoffen wird zusätzlich ebenfalls Festigkeit und Dauerhaftigkeit im Vergleich mit unverarbeitetem Holz erhöht. Ein Vergütungseffekt wird auch erzielt, indem Holz minderer Qualität in die Mittellage eines Holzwerkstoffes eingebracht wird, wo eine geringere Belastung herrscht [Colling 1990].

### 2.1.2 Physikalische Eigenschaften

Dichte und Holzfeuchte sind wichtige physikalische Eigenschaften des Holzes und haben große Bedeutung für die Entwicklung von Methoden zu seiner zerstörungsfreien Prüfung, da die Heterogenität in diesem Bereich von verschiedenen Baumarten, aber auch innerhalb eines Baumes zu einer großen Schwankungsbreite dieser physikalischen Parameter führt.

Holz ist ein poröses und hygroskopisches Material. Diese beiden Eigenschaften haben zur Folge, dass Wasser bis zum Fasersättigungspunkt angezogen wird und darüber hinaus in den Poren des Holzes eingelagert werden kann, ein Verhalten, das in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt wird.

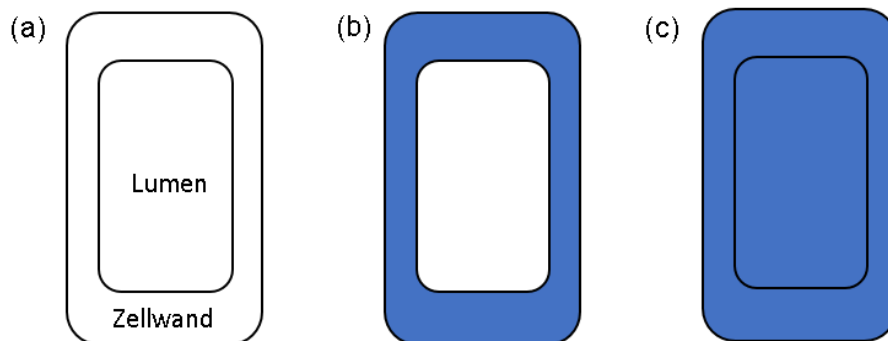


Abbildung 2.3: Schematische Abbildung einer Holz-Zelle mit den drei Feuchtigkeitsgrenzzuständen: Darrtrocken (a), Fasersättigungspunkt (b) und Wassersättigungspunkt (c).

Im darrtrockenen Zustand befindet sich keinerlei Wasser in den Zellwänden und den Lumen. Steigt die Luftfeuchte, nimmt das Holz aus der Umgebung gasförmiges Wasser auf, bis sich eine Ausgleichsfeuchte einstellt. Durch die Wassereinlagerung breitet sich das Holz aus und quillt. Nimmt die Feuchte hingegen ab, schwindet das Holz wieder, und es bilden sich Risse oder Delaminationen. Dadurch kann die Festigkeit in Holzbauteilen sinken, sodass sie unter Umständen nicht mehr tragfähig sind. Ist der Fasersättigungspunkt im Holz erreicht, stellt sich das maximale Quellmaß ein, und Wasser sammelt sich nur noch in den Poren an. Ein weiteres Quellen findet über den Fasersättigungspunkt hinaus nicht mehr statt [Fengel and Wegener 1983]. Der Feuchtegehalt des Holzes hat Auswirkungen auf die Messergebnisse von Ultraschallmessungen und sollte bei deren Bewertung berücksichtigt werden [Bucur 2005].

Die Dichte von Holz kann auf zwei verschiedene Arten angegeben werden [Niemz 1993]:

Die Rohdichte  $\rho_u$  bezeichnet den Quotienten aus der Masse des Holzes  $m$  und dem äußeren Volumen  $V$  bei definiertem Feuchtegehalt  $u$ :

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u}. \quad (1)$$

Die Darrdichte  $\rho_{dtr}$  gibt den Wert des Quotienten aus Masse  $m$  und Volumen  $V$  des darrtrockenen Holzes  $d_{tr}$  an:

$$\rho_{dtr} = \frac{m_{dtr}}{V_{dtr}}. \quad (2)$$

Extreme Dichteunterschiede, verursacht durch eine unterschiedliche Porenverteilung, sieht man zwischen den Holzarten Balsa mit einer Darrdichte von  $130 \text{ kg/m}^3$  und Pockholz mit einer Darrdichte von  $1230 \text{ kg/m}^3$ , wodurch letzteres schwerer ist als Wasser [Niemz 1993]. Außer zwischen den Holzarten variiert die Dichte auch innerhalb eines Stammes. So ist sie im Frühholz durch einen höheren Porenanteil geringer als im Spätholz, welches zum Ende der Vegetationszeit gebildet wird.

### 2.1.3 Natürliche Inhomogenitäten

Holz besitzt verschiedene Wuchsfehler, die dafür sorgen, dass der Baustoff von Natur aus inhomogen ist. Diese Inhomogenitäten beeinflussen die Materialeigenschaften des Holzes und können sich beispielsweise in Rissen, Ästen und anderen Wuchsfehlern zeigen.

Risse können beispielsweise durch den Trocknungsprozess entstehen, indem sich durch das Schwinden des Holzes Spannungen aufbauen, die sich in eben diesen Rissen entladen. Risse können auch durch eine unsachgemäße Fällung und/ oder Lagerung im Wald entstehen, die meist als Kernrisse auftreten. Durch einen ungleichmäßigen Wuchs können sich auch während des Wachstums Spannungen im Holz aufbauen und sich in Ringrisen entlang der Jahresringe entladen.

Äste befinden sich zu Beginn des Wachstums immer im äußeren Bereich des Stammes. Mit zunehmendem Alter gelangen sie immer tiefer ins Stammesinnere, da das neue Holz um den Ast herum gebildet wird, sodass der Stamm nach außen wächst. Stirbt der Ast ab und befindet

sich Rinde um den Ast herum, entstehen tote Äste, die nicht mehr mit dem umliegenden Holz verbunden sind und unter Umständen im geschnittenen Holz herausfallen können. Dadurch verringert sich der nutzbare Querschnitt des Bauteils. In der Praxis werden Bäume teilweise von toten Ästen befreit, damit möglichst breite Schichten des äußeren Stammes schnell frei von Ästen sind und dadurch die Qualität des Holzes steigt.

Wuchsfehler sind ein Abweichen von der homogenen Wuchsform des Holzes. Diese Abweichung entsteht in erster Linie durch eine Abholzigkeit, wenn der Stamm seine zylindrische Form verlässt und beispielsweise am Boden breiter wird oder wenn Wurzelausläufer die runde Stammform beeinflussen. Andere Wuchsfehler sind beispielsweise Wimmerwuchs, Drehwuchs, Zwieselwuchs, Krebsgeschwüre und das Reaktionsholz, das sich in Druck- oder Zugholz aufteilt.

### 2.1.4 Schadensfälle

Da Holz ein organisches Material ist, besteht immer die Gefahr, dass es zersetzt und zerstört wird. Nahezu alle Schadensfälle entstehen durch eine erhöhte Feuchtigkeit im Holz, die die Ansiedlung von holzerstörenden Pilzen und Insekten begünstigt. Die Kenntnis der verschiedenen Schadensfälle ist von entscheidender Bedeutung, um die Messergebnisse der ZfP richtig zu interpretieren.

Es gibt zwei große Gruppen von Verursachern, durch die Schäden im Holz entstehen können: Pilze und Insekten. Den Großteil der Schäden verursachen holzerstörende Pilze. Wichtigste Vertreter sind die Moderfäule, Braunfäule und Weißfäule [Fengel and Wegener 1983]. Der echte Hausschwamm gehört zur Braunfäule und ist in Europa die Pilzart mit dem größten Schadenspotenzial. Er ist besonders aggressiv, da er über sein Strangmyzel Wasser über große Entfernungen transportieren kann, unter Umständen auch vom feuchten Keller bis in die oberen Stockwerke eines Gebäudes, wo er beispielsweise die Balkenköpfe einer Holzdecke befällt.

Holzarten haben unterschiedliche Resistenzen gegenüber holzerstörenden Pilzen. Verschiedene Holzinhaltsstoffe halten die Pilze davon ab, das Holz zu zersetzen. Diese Fähigkeit wird nach DIN EN 350<sup>1</sup> in den Dauerhaftigkeitsklassen 1-5 dargestellt. Eine hohe Dauerhaftigkeit besitzt die Robinie (1-2) und die Eiche (2). Deutlich anfälliger gegenüber Pilz- und Insektenbefall sind Kiefer (3), Fichte (4) und Buche (5).

Wie in Abbildung 2.4a dargestellt, besteht die Gefahr eines Pilzbefalls darin, dass er über lange Zeit unentdeckt bleiben kann, da er häufig zuerst im Inneren des Bauteils wächst und dort die Holzsubstanz zerstört. Dadurch kann es zu einem plötzlichen Versagen des Balkens oder der gesamten Konstruktion kommen. Durch die Braunfäule wird zuerst die stabilisierende Zellulose abgebaut, wodurch auch die typisch braune Verfärbung an der Schadstelle resultiert. Deutlich sichtbare Fruchtkörper entstehen erst nach einer langen Wachstumsphase des Pilzes.

---

<sup>1</sup> DIN EN 350:2016-12 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Prüfung und Klassifizierung der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten gegen biologischen Angriff

Sie sind ein Indiz für eine fortgeschrittene Schädigung und der damit einhergehenden verminderten Festigkeit des Holzes [Kempe 2009].

Holzerstörende Insekten stellen die zweite große Schadensursache dar. Die bekanntesten Vertreter sind in Deutschland der Hausbock und der gewöhnliche Nagekäfer [Kempe 2009]. Beide Insektenarten können, wie sonst nur wenige Schädlinge, auch trockenes Holz befallen. Für die Zerstörung im Holz sind eigentlich nicht die Käfer, sondern deren Larven verantwortlich. Sie leben mehrere Jahre im Holz und fressen sich in einem Gangsystem hindurch. Dabei sind sie meist im nährstoffreichen Splintholz anzutreffen und meiden das Kernholz, das sich durch verschiedene Holzinhaltstoffe vor einem Befall schützen kann. Sobald die Larven ausgewachsen sind, verpuppen sie sich, um dann als Käfer das Holz zu verlassen und später wieder zur Eiablage einzudringen, wodurch ein Kreislauf entsteht. Von außen sichtbar ist ein Befall erst dann, wenn die Käfer die charakteristischen Ausfluglöcher hinterlassen. Die Fraßgänge der Insekten sind im Allgemeinen von einer dünnen Restschicht Holz verdeckt. Mit einem spitzen Gegenstand können diese Fraßgänge geöffnet und der Befall bestimmt werden [Lißner and Rug 2018].

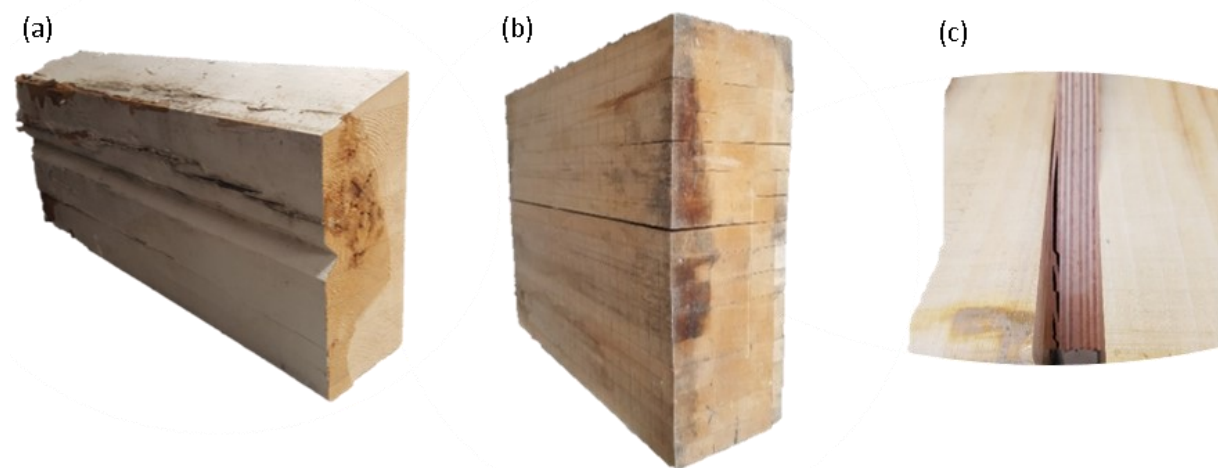


Abbildung 2.4: Schadensbilder einiger Probekörper: Holzbalken mit Braunfäule (a), Brett-schichtholzträger und Multiplex mit Delamination/ Riss (b-c).

Neben den biologischen Schadensfällen können auch Produktionsfehler bei der Herstellung von Holzwerkstoffen zu Defekten führen. Die gängigsten Produktionsfehler sind Delamination, Blasenbildung und Risse, die in Abbildung 2.4b-c dargestellt sind [Dunky and Niemz 2013].

Delaminationen können durch eine falsche Klebstoffart und Auftragsmenge, oder durch ungünstig gewählte Pressparameter wie Druck oder Zeit entstehen. Wird der Druck und die Presszeit beispielsweise zu gering gewählt, hat der Leim nicht ausreichend Haftung und Zeit, um sich mit dem Holz zu verbinden. Diese Art von Fehlverklebung liegt vor, wenn sich zwei Holzteile innerhalb der Nutzungsphase voneinander ablösen, was zu einem Festigkeitsverlust führt [Dunky and Niemz 2013].

Blasen können im Produktionsprozess von Plattenwerkstoffen entstehen. Wassereinschlüsse in der ca. 100°C heißen Platte führen dazu, dass das Wasser während des Pressvorgangs verdampft und die Platte nach dem Pressen an dieser Stelle durch den hohen Verdampfungsdruck aufplatzt. Häufig kommt es aber nur zu einer leichten Ausdehnung, sodass innerhalb der Platte ein kleiner Riss entsteht, der von außen mit dem Auge nicht sichtbar ist. Mithilfe spezieller Messgeräte kann dieses Aufplatzen anhand einer minimalen Höhenänderung detektiert werden [Solbrig et al. 2015].

Risse entstehen, wenn Hölzer mit unterschiedlicher Spannung nicht fest genug verklebt werden, oder wenn durch Schwinden oder Quellen zusätzliche Spannungen aufgebaut werden, die das Bauteil nicht mehr ausgleichen und nur noch durch Rissbildung abbauen kann. Begünstigt wird die Rissbildung auch durch die Verwendung von feuchtem Holz im Herstellungsprozess, das erst während der Nutzung trocknet und dabei Risse bildet [Dunky and Niemz 2013].



## 2.2 Ultraschalltechnik und deren Anwendung an Holz

Wenn Ultraschall auf ein Material trifft, verändert sich der Schall in Abhängigkeit von den physikalischen Eigenschaften des verwendeten Werkstoffs und seiner Ausrichtung. Ein gutes Verständnis der Ultraschalleigenschaften ist wichtig, um geeignete Lösungsansätze für die Holzfehlererkennung zu finden.

### 2.2.1 Schall

Schall ist eine mechanische Welle in einem elastischen Medium, bei der benachbarte Teilchen um ihre Gleichgewichtslage schwingen. Je nach Art des Mediums, in dem sich der Schall bewegt, unterscheidet man zwischen Luft- und Körperschall. Die unterschiedlichen Frequenzspektren sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Der Ultraschall befindet sich *über* dem von Menschen hörbaren Schall von ca. 20 kHz. Frequenzen von unter 16 Hz, dem sogenannten Infraschall, sind vom Menschen ebenfalls nicht mehr zu vernehmen [Krautkrämer and Krautkrämer 1986].

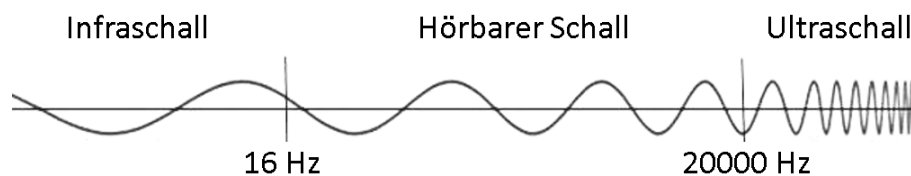


Abbildung 2.5: Verschiedene Schallarten und Frequenzen.

In der Ultraschalltechnik wird der Impuls im Prüfkopf meist durch piezokeramische Kristalle oder auch ferroelektrische Materialien angeregt. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung kommt es zu einer Dickenschwingung, die zu einem mechanischen Druck (Schalldruck) führt. Dieser Prozess kann auch in umgekehrter Reihenfolge ablaufen.

Bei der Charakterisierung der Prüfköpfe ist die Intensität eine wichtige Größe. Sie beschreibt die Schalleistungsdichte, also die Energie, die pro Zeit und Fläche aufgewendet wird. Die akustische Impedanz des Materials ist der Schallwellenwiderstand und von großer Bedeutung bei der Wellenausbreitung an Grenzschichten von zwei Materialien [Krautkrämer and Krautkrämer 1986].

### 2.2.2 Wellenarten

Die beiden wichtigsten Wellenarten für die Ultraschalltechnik sind die Longitudinalwelle (auch Druckwelle, Kompressionswelle) und die Transversalwelle (Scherwelle). Beide Wellenarten kommen in Reinform nur in einem homogenen, isotropen, unendlich ausgedehnten Raum und unabhängig voneinander vor. In einem begrenzten Raum entstehen auch andere Wellen, die aber immer Kombinationen der beiden Grundwellenarten darstellen [Krautkrämer and Krautkrämer 1986].

Durch die Ausbreitung der Schwingung geht im Idealfall keine Energie verloren. Dies ist aber nur im Vakuum der Fall – in allen anderen Medien muss mit Reibungsverlusten gerechnet werden. Bei gegebener Frequenz hängen Phasengeschwindigkeit und Wellenlänge vom Ausbreitungsmedium und der Wellenart ab. Die Wellenlänge  $\lambda$  ist der kleinste Abstand von zwei Punkten mit gleicher Phase, wobei  $c$  die Phasengeschwindigkeit und  $f$  die Frequenz der Welle ist:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Abbildung 2.6 zeigt die verschiedenen Wellentypen, die in Festkörpern entstehen können. Die Longitudinalwelle ist die Welle mit der höchsten Geschwindigkeit, bei der die einzelnen Teilchen in Richtung der Ausbreitung hin und her schwingen. Nach dem Durchlauf der Schwingung bewegen sich die Teilchen wieder in ihre Gleichgewichtslage zurück. Während einer Messung erreicht die Longitudinalwelle den Empfänger zuerst – später folgt dann beispielsweise die Transversalwelle.

Bei der Transversalwelle schwingen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ähnlich einem Seil, dass von oben nach unten geschwungen wird. Im Gegensatz zu Feststoffen können in Gasen und meist auch in Flüssigkeiten nur Longitudinalwellen entstehen, da die Teilchen keine Scherspannungen übertragen können.

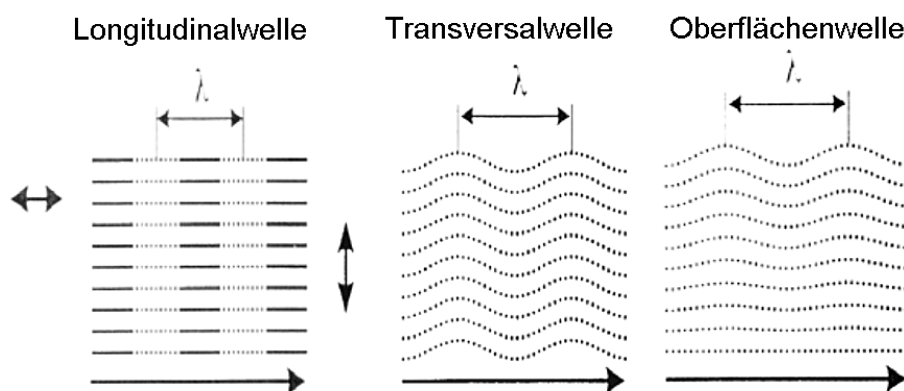


Abbildung 2.6: Verschiedene Wellenformen in Festkörpern [Krause et al. 1999].

Abhängig vom Einfallswinkel des Ultraschallimpulses können auch noch andere Wellenarten entstehen. Werden Ultraschallwellen durch den Probekörper gesendet, so können vor allem bei der Reflektionsanordnung (vgl. Kapitel 2.2.5) störende Rayleighwellen, sogenannte Oberflächenwellen, auftreten. Bei den Rayleighwellen bewegen sich die Teilchen auf elliptischen Bahnen. Ihre Amplitude ist an der Oberfläche am größten und nimmt mit wachsendem Abstand zur Oberfläche exponentiell ab [Krautkrämer and Krautkrämer 1986]. Da die Oberflächenwellen das Messergebnis stören, sollten sie möglichst unterdrückt werden. Eine Schallabschirmung könnte diese negativen Einflüsse einschränken.

Des Weiteren können Kriechwellen auftreten, die an der Holzoberfläche entlanglaufen und permanent Longitudinal- und Transversalwellen abspalten, die zu einem Störsignal führen

können. Besitzt das zu prüfende Holzbauteil ähnliche Abmessungen wie die Wellenlänge des Ultraschallsignals, kann es zu störenden Stab- und Plattenwellen kommen. Deren Einfluss kann minimiert werden, indem das Verhältnis zwischen der Dicke des Bauteils und der Wellenlänge des Ultraschalls das Verhältnis 2:1 nicht unterschreitet [Döring 2011]. Bei der Herstellung der Probekörper wurde diese Problematik berücksichtigt und eine Plattenmindestdicke von 30 mm eingehalten. Bei der Abbildung von Fehlstellen in Platten mit einer Dicke von unter 30 mm müssten die Kriechwellen in die Auswertung mit einbezogen werden.

Eine weitere Anforderung an die Wahl der geeigneten Wellenlänge folgt aus der Betrachtung der natürlichen Inhomogenitäten des Holzes. Damit beispielsweise ein Wuchsmerkmal, das keine qualitative Minderwertigkeit und damit keinen Detektionsbedarf bedeutet, nicht zur Fehldiagnose führt, sollte die Wellenlänge deutlich größer als natürliche Inhomogenitäten im Holz sein, die, sofern unbedenklich, nicht detektiert werden sollen.

### 2.2.3 Schallgeschwindigkeit

Die Longitudinal- und Transversalwellengeschwindigkeit hängt von dem dynamischen Elastizitätsmodul, der Dichte und der Poisson-Zahl des Materials ab. Die Schallgeschwindigkeit wird demzufolge maßgeblich vom strukturellen Aufbau des Holzes beeinflusst.

Folgende Einflüsse im Holz, die die Schallgeschwindigkeit verändern, sind zu nennen [Niemz 1993; Bekhta et al. 2002]:

- die Faserlänge
- die Rohdichte
- der Früh- und Spätholzanteil
- der Faserwinkel
- Holzfehler
- der Feuchtegehalt

Da Holz ein anisotroper Werkstoff ist, besitzt es unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten in seinen drei anatomischen Grundrichtungen. Kennwerte verschiedener Hölzer sind in Tabelle 2.1 dargestellt. So ist die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle in Faserrichtung 4000-6000 m/s, senkrecht zur Faser jedoch nur 400-2000 m/s. In tangentialer Richtung ist die Geschwindigkeit nochmals ca. 20 % kleiner als in radialer Richtung [Niemz 1993]. Daraus folgt, dass bei der Bewertung der Schallgeschwindigkeit die anatomischen Grundrichtungen im Holz beachtet werden müssen. Im Vergleich zur Longitudinalwelle kann die Transversalwelle unter Umständen eine nur halb so große Schallgeschwindigkeit besitzen, wodurch sie sich zeitlich gesehen von der schnelleren Longitudinalwelle trennt.

Tabelle 2.1: Schallgeschwindigkeit in Holz und Spanplatte in m/s [Burmester 1968, 1965].

<i>Material</i>	<i>in Faserrichtung</i>	<i>radial</i>	<i>tangential</i>
<i>Kiefer</i>	5380	1898	1630
<i>Rotbuche</i>	4929	1996	1455
<i>Fichte</i>	4780	1681	1283
<i>Spanplatte</i>	600 ... 800 ... 1200		

Durch die Homogenisierung der Holzbestandteile verringert sich der Einfluss der Anisotropie. Dadurch gleichen sich die Wellengeschwindigkeiten in den unterschiedlichen Grundrichtungen mancher Holzwerkstoffe einander an.

Für die Luftultraschallmessung ist auch die Schallgeschwindigkeit in der Luft von Bedeutung, da ein Großteil der zurückgelegten Strecke nicht im Probekörper selbst, sondern in der Umgebungsluft liegt. Die Schallgeschwindigkeit der Luft ist abhängig von der Lufttemperatur und in geringem Maße auch von der Luftfeuchtigkeit. Näherungsweise liegt die Geschwindigkeit bei 343 m/s [Burmester 1965].

#### 2.2.4 Schallschwächung

Mit Schallschwächung oder Dämpfung bezeichnet man die Tatsache, dass in einem schallfähigen Material die Amplitude des Schalls mit der Zeit abnimmt, bis unter Umständen überhaupt keine Schwingung mehr auftritt. Die Schallschwächung wird in dB angegeben. Mit dieser logarithmischen Hilfsmaßeinheit kann der Schalldruckpegel oder das Dämpfungsmaß angegeben werden.

Wie schon bei der Schallgeschwindigkeit gibt es auch bei der Dämpfung eine große Variationsbreite, verursacht durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Gehölze. So ist beispielsweise die Dämpfung einer Longitudinalwelle im Fichtenholz längs der Faser mit 200 dB/m mehr als sechsmal so niedrig wie in tangentialer Richtung mit 1500 dB/m [Bucur 2005]. Diese Messwerte sind aber nicht allgemein gültig, sondern stark abhängig von Wellenart, Frequenz, Probekörper und Versuchsaufbau.

Auch der Feuchtegehalt des Holzes hat einen großen Einfluss auf das Messergebnis von Ultraschallverfahren, wie Abbildung 2.7 zeigt. Bei einem Probekörper aus Holz, der zuerst trocken und nach einer 30-minütigen Wasserlagerung nochmals durchschallt wurde, zeigte sich, dass das Ultraschallsignal bei nassem Holz um ungefähr 16 dB gedämpft wird [Stößel 2004].

Diese Untersuchung verdeutlicht die Relevanz des Wassergehalts im Holz. Aus diesem Grund wurde der Wassergehalt der Probekörper überwacht und in einer Klimakammer konstant gehalten. Unabhängig von der fehlenden Praktikabilität ist es daher verständlich, dass eine Ultraschall-Prüfung unter Wasser, ein bei anderen Materialien geschätztes Verfahren, für Holz

nicht in Frage kommt. Eine um 16 dB verringerte Amplitude würde, trotz einer sehr guten Ankopplung des Signals an das Bauteil, kein gutes Ergebnis zulassen.

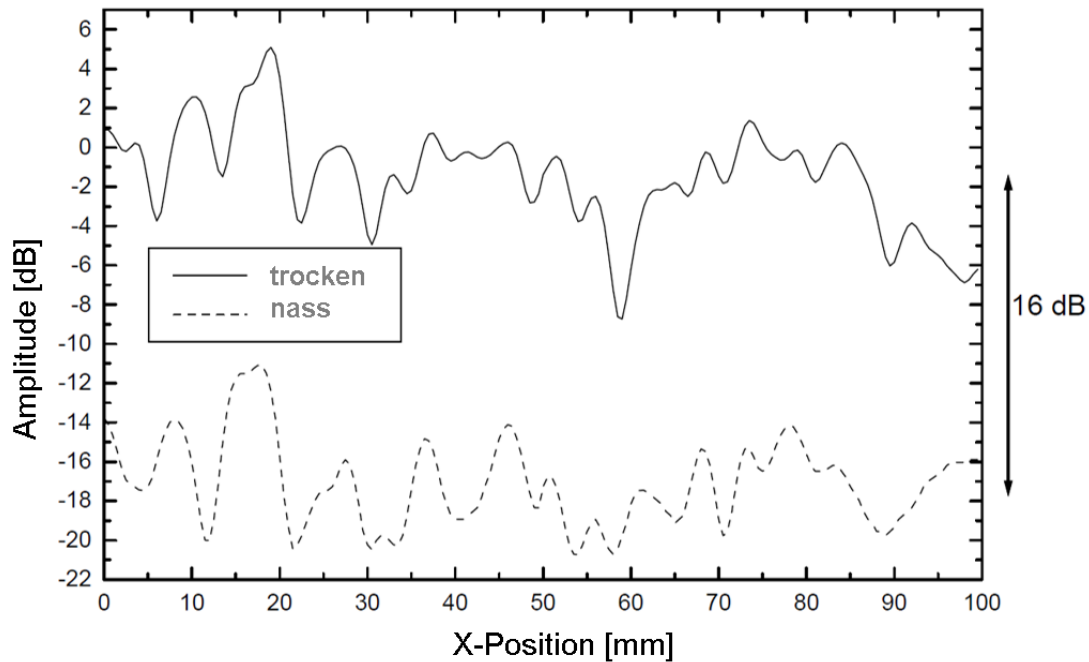


Abbildung 2.7: Amplitudenverlauf des Ultraschalls bei trockenem Holz und bei Holz nach einer 30-minütigen Wasserlagerung [Stößel 2004].

### 2.2.5 Transmission und Reflektion

Für die ZfP von Holzbauteilen kommen verschiedene Messmethoden zum Einsatz: zum einen die Transmissionsmessung, bei der sich der Probekörper zwischen Sender und Empfänger befindet, zwischen denen sich der Schall bewegt. Befindet sich eine Fehlstelle im Bauteil, kommt es zu einer Veränderung der Schallintensität oder zu einer Verlängerung der Laufzeit. Nachteilig ist die benötigte beidseitige Zugänglichkeit des Objekts, die in der Praxis nicht immer gegeben ist.

Eine andere Methode ist die Messung in Reflektion, bei der sich Sender und Empfänger auf einer Bauteilseite befinden und das reflektierte Signal vom Empfänger aufgezeichnet wird. Aus der zweifachen Frequenz  $f$  lässt sich außerdem bei bekannter Longitudinalwellengeschwindigkeit  $c_L$  die Tiefe  $d$  einer Fehlstelle wie folgt bestimmen:

$$d = \frac{c_L}{2f} \quad (4)$$

In der Praxis ist die Auswertung der Messung in Reflektion aber komplexer, da beispielsweise die geometrische Gestalt und der Aufbau des Probekörpers Einfluss auf die Berechnung haben. Bei der Longitudinalwellengeschwindigkeit ist zu beachten, dass sie abhängig vom Material des Probekörpers und dessen Struktur ist [Algernon et al. 2016].

Bei dem Versuchsaufbau für eine Messung in Reflektion führen Fehlstellen oder die Bauteilrückwand zu einer Reflektion der Welle, woraus Rückschlüsse auf den Zustand des Bauteils gezogen werden können. Da das Rückwandecho das Bauteil zweimal durchlaufen

muss, wird die Welle stärker gedämpft, sodass sich bei diesem Verfahren im Vergleich zur Transmissionsanordnung nur Bauteile geringer Dicke untersuchen lassen. Zusätzlich sorgt der Abstand zwischen Sender und Empfänger dafür, dass das Bauteil schräg durchschallt wird und der Schallweg sich dadurch weiter verlängert.

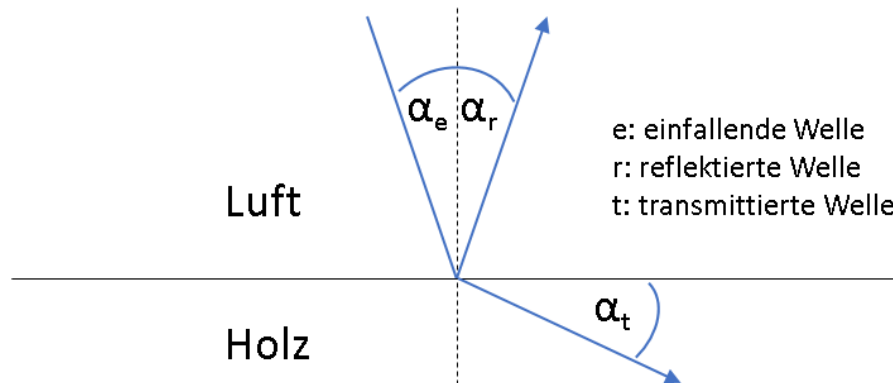


Abbildung 2.8: Schematische Abbildung sowohl einer reflektierten als auch einer transmittierten Welle an der Grenzfläche von Luft und Holz.

Trifft die Welle eines Ultraschallimpulses bei einer Transmissions- oder Reflektionsmessung auf das Holz an der Grenze zur Umgebungsluft, kommt es neben der beabsichtigten Reflektion auch zu einer Transmission der Welle (Abbildung 2.8). Dies geschieht immer dann, wenn die Grenzfläche zweier Medien unterschiedliche Impedanzen aufweist. Ist der Schallwellenwiderstand null, wird das gesamte Signal reflektiert (Totalreflektion). Die Impedanz  $Z$  ergibt sich als Produkt aus der Dichte  $\rho$  und der Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle  $c_L$ .

$$Z = \rho \times c_L \quad (5)$$

Holzwerkstoffe eignen sich für die Reflektionsmessung in besonderem Maße, da der Impedanz-Unterschied zwischen Luft und Holz geringer ist als beispielsweise zwischen Luft und Beton. Durch die relativ geringe Impedanz-Differenz erhöht sich nämlich der Energieanteil der Welle, die in das Bauteil transmittiert [Algernon et al. 2016].

Der Winkel, in dem die Welle auf das Bauteil trifft, ist von großer Bedeutung. Je größer der Winkel, desto kleiner ist der Anteil der Welle, der durch das Objekt transmittiert. Auch spaltet sich bei zunehmendem Einfallswinkel aus der einfallenden Longitudinalwelle eine sogenannte Rayleighwelle ab [Krause et al. 1999]. Durch die Änderung des Einfallswinkels und des Prüfkopfabstandes von Sender und Empfänger können Wellenarten je nach Bedarf unterdrückt oder verstärkt werden.

### 2.2.6 Luftgekoppelter Ultraschall

Luftgekoppelter Ultraschall besitzt für die ZfP von Holzwerkstoffen großes Potenzial. Für eine Messung muss kein direkter Kontakt zum Probekörper hergestellt werden, da die Luft als Verbindungsmedium fungiert. Dadurch sind hohe Messgeschwindigkeiten möglich, die insbesondere für die industrielle Anwendung von entscheidender Bedeutung sind. Zudem ist

es für die Industrie von Vorteil, dass zur Durchführung einer Messung keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden müssen, da es sich um ungefährliche akustische Schallwellen handelt (vgl. 3.1.3.2). Nachteilig sind die Intensitätsverluste, die aus den unterschiedlichen Impedanzen der Materialien resultieren.

Neuerungen der letzten Jahre in der Prüfkopftechnik des luftgekoppelten Ultraschalls haben zu einer Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten geführt. Insbesondere in der Luft- und Raumfahrt hat das Verfahren breiten Einsatz gefunden, da es sich hier um kostenintensive und sicherheitsrelevante Bauteile handelt, die eine aufwendige Untersuchung rechtfertigen [Döring 2011; Hillger et al. 2012]. Neue leistungsstärkere Prüfköpfe mit einem großen Signal-Rausch-Abstand ermöglichen zudem die Untersuchung von großen Bauteilen und Materialien mit hohen Impedanz-Unterschieden. Sofern ein Bauteil von zwei Seiten zugänglich ist, wird die Messung in Durchschallung favorisiert. Dennoch stehen auch immer Bauteile zur Prüfung an, die nur einseitig zugänglich sind.

Trotz diverser technischer Weiterentwicklungen ist die Anzahl an Veröffentlichungen im Forschungsbereich ZfP in Durchschallung, insbesondere ZfP an Baumaterialien, noch sehr überschaubar. Beispielsweise wurden Untersuchungen an unverbauten Materialien wie Holz, Keramik und Kompositwerkstoffen durchgeführt, die die Abbildung von Lufteinschlüssen und Rissen mit geringer Auflösung ermöglicht [Stößel 2004; Solodov and Busse 2006].

Luftgekoppelter Ultraschall mit Reflektionsanordnung wurde bereits an Lavabasaltplatten angewendet, womit innenliegende Risse und das Rückwandecko abgebildet werden konnten [Hillger et al. 2004]. Ferner wurden Untersuchungen mit luftgekoppeltem Ultraschall in Reflektion an Betonbauteilen durchgeführt, um Rückwandeckos, Kiesnester und Hohlstellen zu orten [Gräfe 2008]. Erste automatisierte Flächenmessungen in Reflektion wurden an einer Bürgersteigplatte demonstriert. Bei diesem Versuch konnte ein innenliegender luftgefüllter Zylinder abgebildet werden [Schickert et al. 2006].

Untersuchungen von Fehlstellen in Holzbauteilen liegen ebenso vor, allerdings nur in Durchschallungsanordnung bei zweiseitiger Zugänglichkeit des Bauteils [Sanabria 2012; Marhenke et al. 2018; Hasenstab 2006]. Insbesondere die Ortung von Fehlverklebungen in Brettschichtholzträgern hat, nach dem Einsturz einer Eissporthalle in Bad Reichenhall, die Forschung in diesem Bereich beschleunigt und vorangebracht. Auch an Plattenwerkstoffen wurden mehrere Untersuchungen mit Luftultraschall durchgeführt, um die Einflüsse von Dichte und Partikelgröße im Hinblick auf die Fehlstellenortung zu analysieren [Hilbers et al. 2012a].

## 2.3 Messtechnik

Für eine erfolgreiche Prüfung des Untersuchungsgegenstandes sind die verwendeten Prüfmittel, Einstellungen und Messaufbauten von großer Bedeutung, weshalb diese Aspekte nachfolgend erläutert werden.

### 2.3.1 Prüfköpfe

Luftgekoppelte Ultraschallprüfköpfe können auf unterschiedlichen physikalischen Effekten basieren. Weit verbreitet sind piezoelektrische Prüfköpfe, die aus einem Kristall bestehen, der sich unter elektrischer Spannung verformt und dadurch einen Ultraschallimpuls auslöst. Da zwischen dem festen Wandlermedium und der gasförmigen Luft ein großer Impedanz-Unterschied besteht, benötigt diese Art von Wandler eine Anpassschicht, um den Unterschied zu verringern und die daraus resultierenden Intensitätsverluste einzudämmen. Diese Anpassschicht besteht in der Regel aus mehreren Schichten und wird auf die Außenseite des Wandlers geklebt.

Einen Schwerpunkt dieser Arbeit ist die zerstörungsfreie Prüfung von Holz mit ferroelektrischen Prüfköpfen auf der Basis von zellulärem Polypropylen (PP). Dieser neuartige Prüfkopftyp besitzt eine hohe Leistungsfähigkeit, die im Folgenden erläutert wird.

Das Wandlermaterial aus geschäumtem Kunststoff besitzt elektromagnetische Eigenschaften und wird als Electro Mechanical Film (EMFi) bezeichnet (Abbildung 2.9). Diese Prüfköpfe müssen für den Einsatz an Holzwerkstoffen charakterisiert und angepasst werden, damit die individuellen Eigenschaften des Holzes berücksichtigt werden können.

Bei zellulärem Polypropylen handelt es sich um geschlossenzelligen Polymerschäum, der aus ca. 50 % Gasblasen und 50 % PP besteht. Mit Hilfe einer Gleichspannungs-Koronaaufladung wird das Material polarisiert [Lerch et al. 2009]. Da die Oberfläche mit zwei Elektroden bedampft wird, erhält der Wandler piezoelektrische Eigenschaften. Indem mehrere Folien miteinander verklebt werden, können die Frequenzen der Wandler verändert werden. Bei einer Folie können Frequenzen von ca. 250 kHz realisiert werden, mit zwei Folien 130 kHz und mit drei Folien ca. 90 kHz.

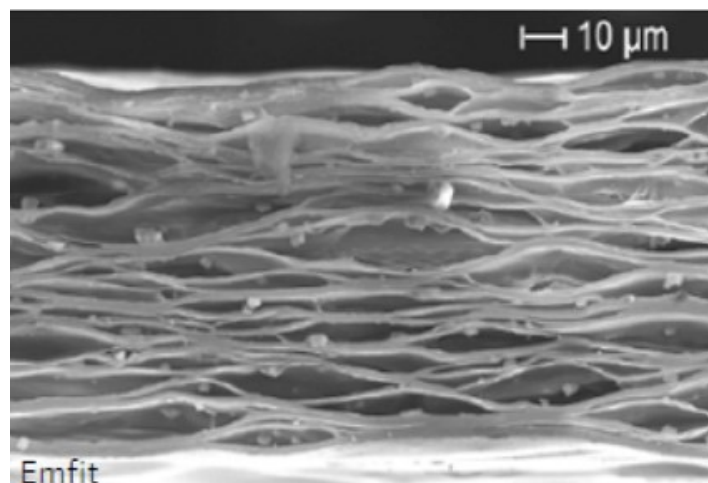


Abbildung 2.9: Folie aus zellulärem Polypropylen mit Porenstruktur, die eine niedrige akustische Impedanz aufweist, ähnlich der von Luft (©EMFIT Ltd.).



Das elektromagnetische Verhalten führt dazu, dass es durch Anlegen einer elektrischen Spannung zu einer reinen Dickenschwingung im Material kommt. Selbst eine lange Nutzungsdauer der Prüfköpfe führt zu keinen schwerwiegenden Leistungseinbußen. Ein Vorteil dieses Wandlers ist ferner, dass aufgrund der ähnlichen Impedanz zwischen zellulärem PP und Luft auf eine Anpassschicht verzichtet werden kann. Dadurch kommt es zu geringeren Leistungsverlusten und höherem Schalldruck. Schließlich handelt es sich um Ultraschall-Prüfköpfe mit einem extrem breiten Frequenzband im Bereich von 20 kHz bis 200 kHz, sodass kurze Ultraschallpulse erzeugt bzw. empfangen werden können [Lerch et al. 2009]. Zusammengefasst besitzen zelluläre PP-Wandler gegenüber herkömmlichen piezoelektrischen Wandlern folgende Vorteile:

- Reine Dickenschwingung des Wandlermaterials
- Lange Nutzungsdauer (ähnlich wie bei piezokeramischen Wandlern)
- Verzicht auf Anpassschicht
- Breites Frequenzband

### 2.3.2 Experimenteller Aufbau

Der Aufbau der Messapparatur ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Um eine Messung mit luftgekoppeltem Ultraschall durchzuführen, wird als erstes durch den Funktionsgenerator ein Puls erzeugt. Als Sendepuls dient ein Rechteckimpuls mit einstellbarer Pulsdauer oder ein Rechteck-Burst-Signal mit veränderbarer Periodendauer und Impulsanzahl, die durch einen Schwingquarz erzeugt werden. Dieser Puls wird dann über einen Leistungsverstärker auf die gewünschte Sendespannung angehoben und vom Ultraschallwandler in ein akustisches Signal umgeformt. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung an das zelluläre Polypropylen kommt es zu einer reinen Dickenschwingung im Material.

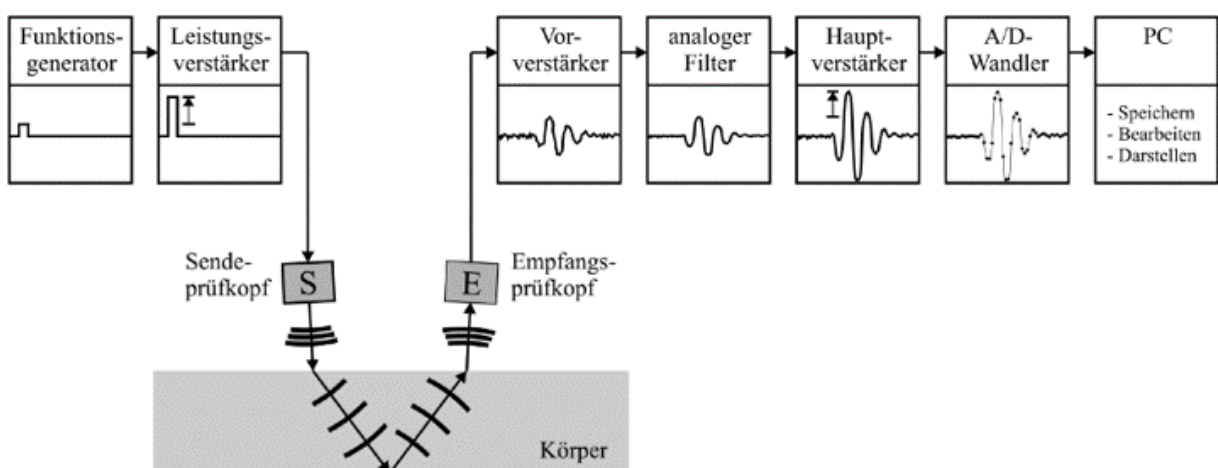


Abbildung 2.10: Aufbau der Apparatur in Reflektion für luftgekoppelten Ultraschall [Gräfe 2008].

Das Ultraschall-Signal läuft durch das Bauteil und wird vom Empfangsprüfkopf aufgezeichnet. Der Empfänger besteht aus Vorverstärker, analoger Filter, Hauptverstärker und dem analog/digital Wandler (A/D-Wandler). Die Funktionsweise ist wie zuvor beim

Sender, nur in umgekehrter Reihenfolge. Da das ankommende Signal viel zu schwach ist, wird es über einen Vorverstärker direkt hinter dem Wandler angehoben und gegebenenfalls gefiltert. Der Vorverstärker ist in 20 dB-Stufen von 6 bis 46 dB umschaltbar, wobei diese Umschaltung per Software erfolgt, und in die Verstärkungseinstellung integriert ist. Über den Hauptverstärker im Rechner, wird das Signal nochmals angehoben. Die maximal mögliche Verstärkung (Vorverstärker + Hauptverstärker) beträgt 110 dB und ist in Inkrementen von 0,5 dB regulierbar. Anschließend kann das analoge in ein digitales Signal umgewandelt werden. Für diesen Schritt kommt ein Quasi-Spitzenwertdetektor zum Einsatz, um die Laufzeit und Amplitude in Zahlenwerte umzuschreiben. Anschließend kann das Signal gespeichert, bearbeitet und dargestellt werden.

Um Holzbauteile automatisiert mit luftgekoppeltem Ultraschall zu prüfen, wurde das Messsystem „USPC 4000 AirTech“ von der Firma Hillger NDT GmbH eingesetzt [Hillger et al. 2004]. Das Scanner-System ist in Abbildung 2.11 dargestellt und setzt sich aus dem Messrechner mit Monitor, Tastatur und Maus und dem eigentlichen Scanner (FlatScan1000) zusammen. Dieses Messverfahren eignet sich sowohl für Messungen in Durchschallung als auch in Reflektion.

Während einer Messung werden die Ultraschallwandler mit Hilfe der verfahrbaren X- und Y-Achsen mäanderförmig über den Probekörper gefahren.

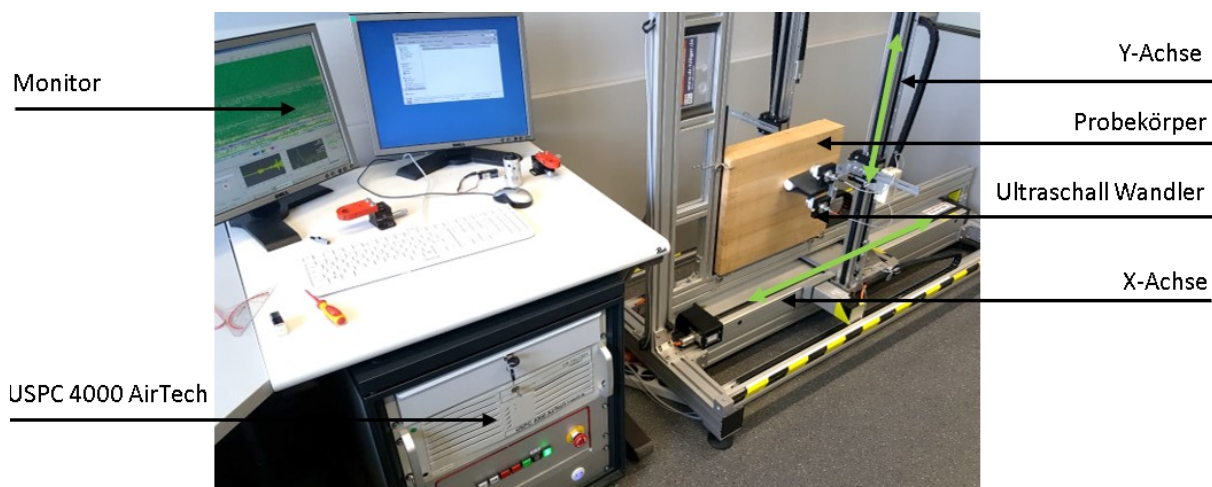


Abbildung 2.11: Experimenteller Aufbau des Scanners.

### 2.3.3 Bildgebung

Das Ultraschall-Verfahren ist bei einer Einzelmessung ein Punktmessverfahren. Je nachdem wie die Messergebnisse dargestellt werden sollen, kann dabei zwischen verschiedenen Varianten unterschieden werden [Krautkrämer and Krautkrämer 1986]:

Durch eine einzelne Messung an einem Punkt erhält man durch den Empfänger, der das akustische Signal in ein elektrisches umwandelt, ein Zeitsignal (A-Bild), das in der Regel keine eindeutige Aussage über die Lage einer Fehlstelle zulässt. Erst wenn viele A-Bilder

aneinandergereiht werden, wird aus der Punktmessung ein globales Testverfahren, das das Scannen von kompletten Flächen ermöglicht.

Werden die einzelnen Messpunkte, die mäanderförmig an dem Prüfobjekt aufgenommen wurden, für jede Messlinie zusammengefügt, erhält man das sogenannte B-Bild. Dabei werden die einzelnen A-Bild-Ebenen parallel angeordnet und es wird den Amplituden je ein Farb- oder Grauwert zugewiesen. Damit ergibt sich ein zweidimensionales Schnittbild des geprüften Körpers [Deutsch et al. 1997]. Ein dreidimensionaler Datensatz wird erzeugt, indem wiederum mehrere B-Bilder verbunden werden. Die Zeitachse ist mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit und des Laufweges auch in eine Tiefenachse umwandelbar. Durch diesen 3D-Raum lassen sich Tiefenschnitte (C-Bilder) und senkrecht dazu liegende Profilschnitte legen, um das Bauteilinnere betrachten zu können und Fehlstellen abzubilden. Diese C-Bilder zeigen die Amplitude des Signals (Abbildung 2.12). Soll hingegen die Laufzeit ausgedrückt werden, wird diese Darstellung D-Bild genannt.

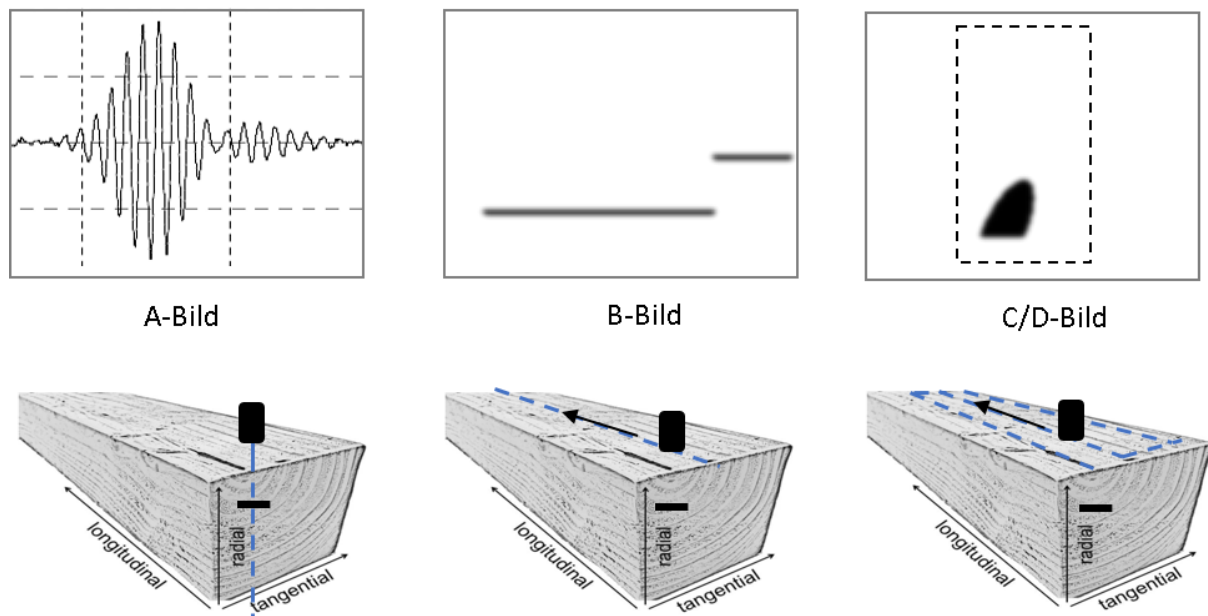


Abbildung 2.12: Darstellung von A-, B-, C- und D-Bildern an einem Holzbalken [Krautkrämer and Krautkrämer 1986].

Bei der Transmissions- und der Reflektionsmessung mit Ultraschall gibt es zwei unterschiedliche Abbildungsverfahren, die jedoch im Versuchsaufbau identisch sind. Beide Abbildungsverfahren können eine Fehlstelle im Holz sichtbar machen.

- Laufzeitverfahren: Bei diesem Verfahren wird die Zeit gemessen, die ein Ultraschallsignal benötigt, um vom Sende-Prüfkopf zum Empfangs-Prüfkopf zu gelangen. Die Laufzeit wird für gewöhnlich in Mikrosekunden ( $\mu\text{s}$ ) angegeben. Bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit gilt es zu beachten, dass der Ultraschallimpuls zunächst einen Teil des Weges in der Umgebungsluft zurücklegt, dann im Bauteil selbst und zuletzt wiederum in der Luft. Für diese Teilstrecken müssen unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten angenommen werden.

- Intensitätsverfahren: Bei diesem Verfahren wird die Intensität des Empfangssignals gemessen. Ausschlaggebend ist die Höhe der ersten Schwingungsamplitude, die in der Regel in Dezibel (dB) angegeben wird. Für die bildliche Darstellung wird die Höhe der Amplitude in eine Farbskala kodiert.

Eine Möglichkeit die Bildgebung zu optimieren, besteht in der algorithmischen Verarbeitung der Ultraschalldaten mittels SAFT. Dies führt zu einer Reduzierung der strukturbedingten Rauschsignale und zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands der Fehlstellen.

#### 2.3.4 Messunsicherheiten

Jede Luftultraschall-Messung beinhaltet einen Messfehler, der sich aus mehreren Einzelfehlern zusammensetzt und sich dabei unter Umständen verstärken kann.

Bei der Luftultraschall-Messung tritt im Gegensatz zur Punktkontakt-Prüftechnik ein Messfehler auf, der aus dem zurückgelegten Weg in der Luft resultiert. Außer diesem Fehler können größere Messunsicherheiten durch die Anisotropie des Holzes, durch den Versuchsaufbau und durch Unebenheiten im Probekörper entstehen.

Bei der Schallgeschwindigkeit in Luft wird ein durchschnittlicher Wert von 343 m/s angenommen (vgl. 2.2.3). Da die Geschwindigkeit aber von der Temperatur und in geringem Maße auch von der Luftfeuchte beeinflusst wird, die bei den Messungen aus Gründen der Vereinfachung nicht berücksichtigt werden, kann die Laufzeit um ca. 1,4 % schwanken.

Größere Bedeutung hat die Messunsicherheit, die sich aus dem Schallweg in der Luft ergibt. Durch Unebenheiten im Holz oder einer Ausrichtung des Probekörpers, die nicht exakt senkrecht zum Prüfkopf ist, verändert sich der Abstand vom Wandler zum Probekörper und damit auch der zurückgelegte Weg in der Luft. Da die Laufzeit in der Luft im Verhältnis zu der im Holz sehr niedrig ist, ist der Einfluss einer solchen Änderung auf die Gesamtlaufzeit hoch. Bei einer Abweichung des angenommenen Schallweges von 1 mm kann die Laufzeit um ca. 6  $\mu$ s abweichen. Bei einer Gesamtlaufzeit von durchschnittlich 400  $\mu$ s liegt die prozentuale Abweichung bei ca. 1,5 %. Um die Messung zu vereinfachen, wird in der Versuchsanordnung von einem ebenen Probekörper ausgegangen.

Bei der Messung in Reflektion hat die Anisotropie des Holzes einen größeren Einfluss auf die Laufzeit als bei einer Messung in Durchschallung. Da der Probekörper bei diesem Aufbau schräg durchschallt wird, läuft der Schall nicht senkrecht durch das Bauteil, sondern abhängig vom Holzaufbau: In longitudinaler Richtung ist der Schall deutlich schneller, in radialer langsamer. Dadurch entstehen unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten innerhalb eines Bauteils. Eine genaue Angabe zur Geschwindigkeit ist dann nicht mehr möglich. Auch bei Holzwerkstoffen, die aus Hölzern mit unterschiedlicher Faserrichtung zu einem Bauteil verklebt werden, ist die Angabe einer materialspezifischen Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Bauteildicke nicht möglich.

Um möglichst exakte Messwerte zu ermitteln, sollten deshalb die Umgebungstemperatur und der Feuchtegehalt in die Auswertung mit einfließen und bevorzugt die Durchschallungsanordnung genutzt werden.

### 3. Main investigations

#### **Paper 1 (accepted manuscript)**

Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A Review

Konrad J. Vössing, Ernst Niederleithinger

Published in *Holzforschung* 72: 467-476, 2018 <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0122>

#### **Paper 2 (accepted manuscript)**

Air-coupled ultrasonic ferroelectret receiver with additional bias voltage

Mate Gaal, Rui Caldeira, Jürgen Bartusch, Florian Schadow, Konrad J. Vössing and Mario Kupnik

Published in *IEEE Transactions on Ultrasonics and Frequency Control* 66: 1600-1605, 2019

© 2019 IEEE. Reprinted, with permission, from Mate Gaal, Rui Caldeira, Jürgen Bartusch, Florian Schadow, Konrad J. Vössing and Mario Kupnik, *Air-coupled ultrasonic ferroelectret receiver with additional bias voltage*, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 10/2019

<https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2925666>

#### **Paper 3 (accepted manuscript)**

Air-coupled ferroelectret ultrasonic transducers for nondestructive testing of wood-based materials

Konrad J. Vössing, Mate Gaal and Ernst Niederleithinger

Published in *Wood Science and Technology* 52: 1527-1538, 2018,

*This version of the article has been accepted for publication, after peer review (when applicable) and is subject to Springer Nature's AM terms of use, but is not the Version of Record and does not reflect post-acceptance improvements, or any corrections. The Version of Record is available online at:*

<https://doi.org/10.1007/s00226-018-1052-8>

#### **Paper 4 (accepted manuscript)**

Imaging wood defects using air coupled ferroelectret ultrasonic transducers in reflection mode

Konrad J. Vössing, Mate Gaal and Ernst Niederleithinger

Published in *Construction and Building Materials* 241: 1-9, 2020,

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118032>

### 3.1 State of the art - Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A Review

Published in *Holzforschung*

Volume 72, 10.03.2018, Pages 467–476

<https://doi.org/10.1515/hf-2017-0122>

Konrad J. Vössing, Ernst Niederleithinger

## State of the art - Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A Review

### Keywords

Drilling Resistance, Electrical Resistivity, Nondestructive Testing, Radar, Radiography, Sonic Stress Wave, Timber Structure, Ultrasound

### Abstract

This paper reviews state-of-the-art nondestructive testing (NDT) methods used to image the condition of structural timber. NDT imaging is used to detect defects, damage, and decay without altering the structure permanently. These methods enable assessment of the extent of wood decay of the tested elements. After interpretation of the data, an assessment of the mechanical properties based on an appraisal of internal defects in the material is feasible. To demonstrate which methods show the most promise, we are presenting both nondestructive and semi-destructive testing methods for subsurface wood testing and the efficacy of those techniques individually and in combination with each other. Most techniques are demonstrated using the same test specimen.

### 3.1.1 Introduction

Wood is a hygroscopic, heterogeneous, and anisotropic material, which means that its mechanical properties are different in the radial, tangential and longitudinal directions. Wood is also biodegradable and changes its dimensions depending on the environmental humidity conditions. These features affect the mechanical properties and performance of structural timber, either due to natural defects or due to biotic decay or mechanical damages due to anisotropy and mechanical load during the service life [Niemz and Mannes 2012]. The influence of natural defects such as knots, cracks and splits must be known in due time. Biotic decay and mechanical damages due to swelling and shrinking are of the greatest interest, as wood is seldom applied under dry conditions [Nowak et al. 2016].

Defects, damages, and decay in timber are treacherously concealed, difficult to localize and expensive to fix. To identify the type and degree of deterioration in timber structures and to recommend appropriate measures against the defects are challenging research aims, in the focus of which are defects leading to strength loss. Testing methods in this context can be subdivided into destructive, semi-destructive and nondestructive (NDT) approaches. The present review will address only the latter two methods, which can be further classified as applicable to large objects, frequently to the entire specimen, such as the ultrasonic waves and radar radiation-based methods, and those applicable to small objects (timber segments), such as drilling resistance and core drilling.

Concerning NDT and nondestructive imaging, the following requirements are crucial: high accuracy, cost- and time-effectiveness and portable devices. Visual inspection is often helpful as the first step in monitoring, but this review focuses on internal inspection of wood defects

in structures because of their practical relevance [Nowak et al. 2016]. Wooden structures are sometimes fully integrated or embedded into walls, making inspection even more challenging.

In contrast to semi-destructive testing techniques, which are usually based on mechanical tests, most of the NDT approaches are based on either ultrasonic or sonic stress waves or on effects of electromagnetic waves (radar i.e. radio detecting and ranging). X-ray methods belong to the radiographic approaches and the resistance against the electrical current is another testing possibility. For the method of choice, the required resolution is decisive: the longer the wavelength, the poorer the resolution [Bucur 2003]. The distance between the measurement points also influences the resolution. Figure 3.1 illustrates the various frequencies of the presented methods. The reliability of the tests in terms of detectable details – such as moisture content, density, grain orientation, holes, etc. – is improved, if tests based on different wavelengths are applied. To generate images, the scanning device is simultaneously moved across the structure, while displaying the resulting echoes of individual pulses as a composite image. The term acoustic tomography of the stress wave approach refers to the perceptible sounds that are caused by the mechanical impulses used for measuring.

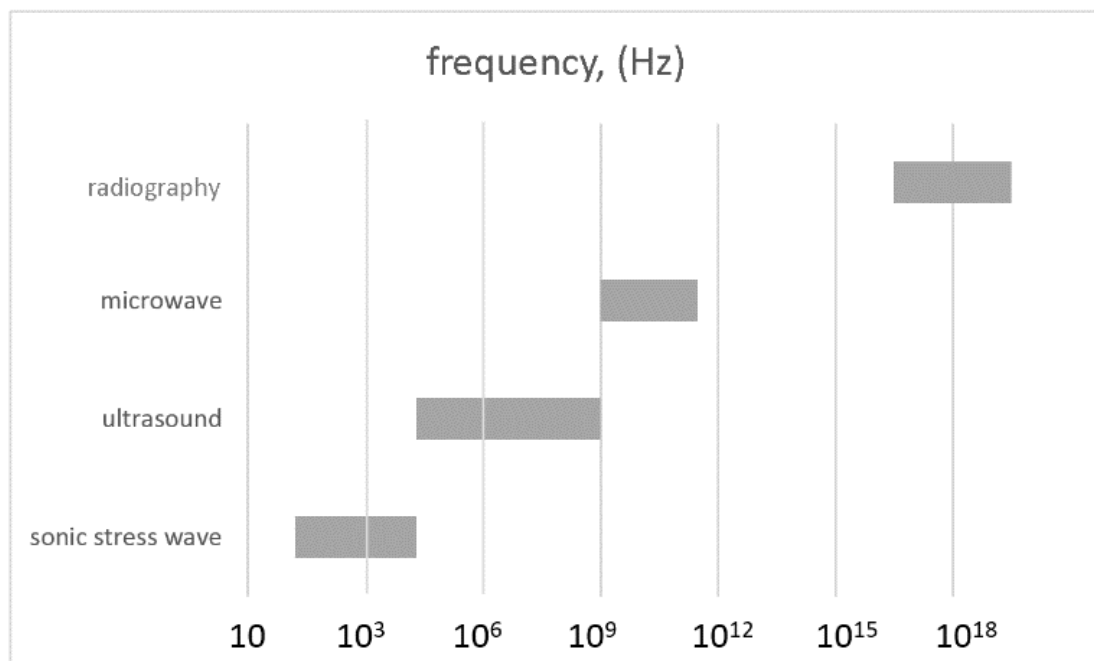


Figure 3.1: Frequency range of the applied methods.

Utilization of wooden structures in both existing buildings and in new construction is increasing, thus the need for reliable tests is also increasing. Various papers have been published on this subject [Niemz 2010; White and Ross 2014; Riggio et al. 2015]. The present paper is an update review of the NDT methods focusing on the internal inspection.

### 3.1.2 Materials and methods

A spruce test specimen was developed to increase the comparability of various methods concerning resolution, penetration depth and applicability (Figure 3.2). The specimen has the dimensions of  $500 \times 400 \times 90 \text{ mm}^3$  and is composed of 16 square timbers stuck together. At the



bottom, 12 drillings are located at various depths and shapes. They range from 10 mm to 50.1 mm and have either blind holes or countersinks. Therefore, some methods such as sounding, electrical resistivity and drilling resistance are not applicable and will be considered separately.

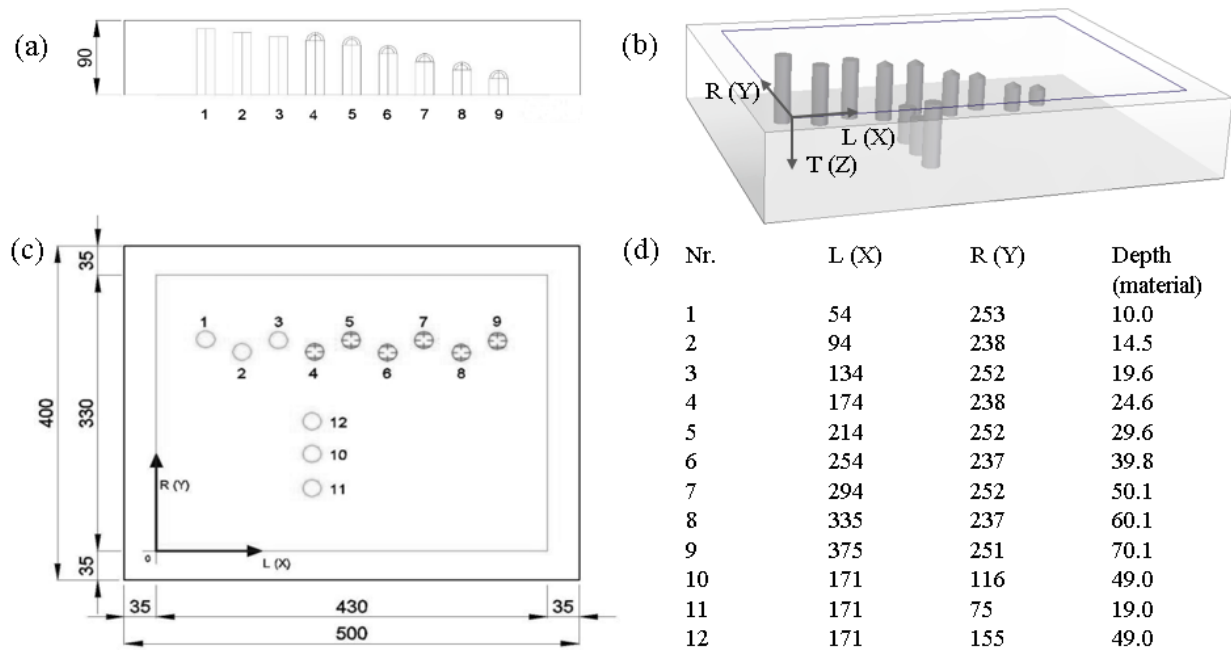


Figure 3.2: Principal setup of the spruce specimen with twelve test-drillings in lateral view (a), top view (b) and 3D view (c). The coordinate system shows the measuring field. Location information of the 12 drillings and their depth, in mm can be taken from tabular (d).

### 3.1.3 The most frequently applied methods

#### 3.1.3.1 Radiography

Radiography was first applied in the 1960s for NDT and nondestructive imaging. Since that time, the size of the devices has constantly decreased, while their resolution has greatly improved. The frequency range of this type of instrument is from 30 PHz to 30 EHz. There are various devices for such portable X-ray based systems such as Seifert Isovolt and GE XR, which allow *in situ* assessment of timber based on high-definition images, but the devices are expensive. One limitation is that both sides of a specimen must be tested because of the low penetration depth. A further limitation is that it affords a two-dimensional image of a three-dimensional structure, and thus it is difficult to determine the depth and the extent of decay in the timber. The most important parameter of the method is the attenuation as a function of the radiation energy, structure thickness and density. Therefore, timber condition is reflected via the density variation of radiographic images [Kasal and Tannert 2011].

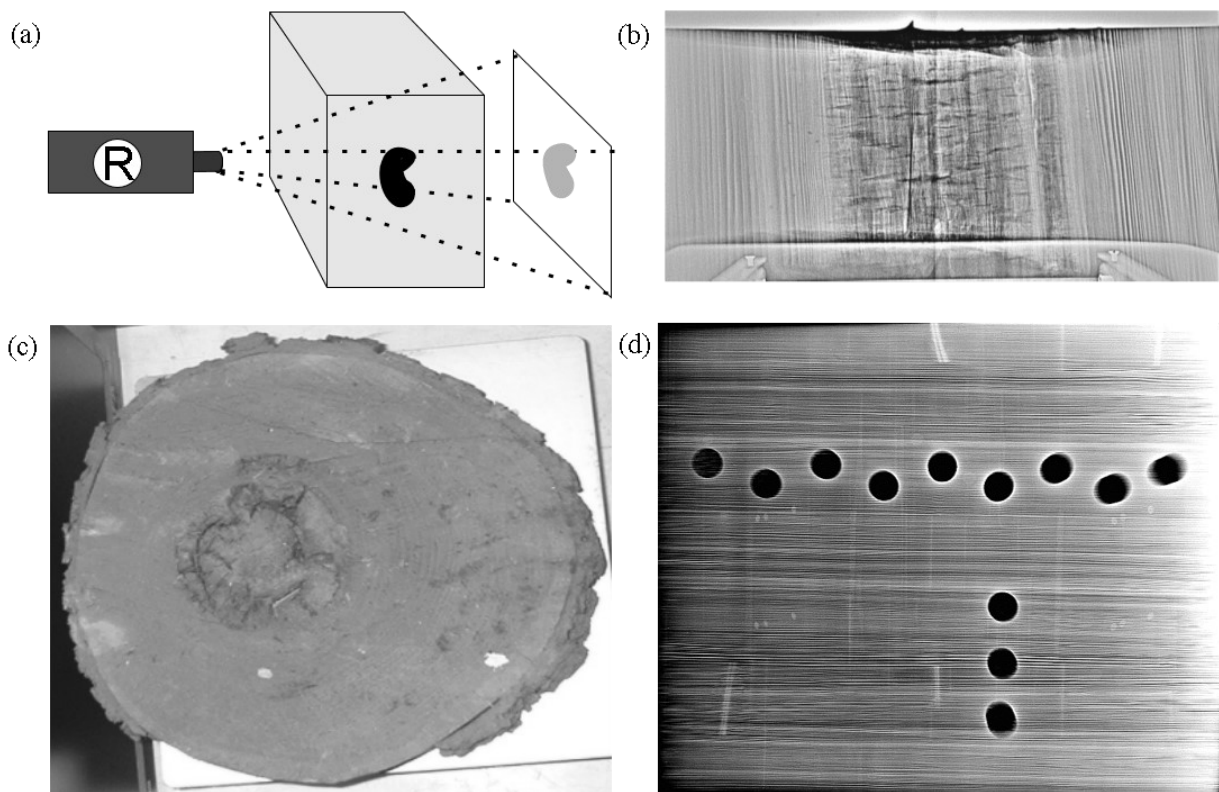


Figure 3.3: Principal setup for radiography measurements (a). Radiograph in lateral view of a tree disc with heart rot (b). Photo of the examined tree disc (courtesy of Dr. Osterloh, BAM 8.3) (c) and Radiograph of the test specimen with an exposure time of three minutes (d).

The principal setup in Figure 3.3a demonstrates the functionality of radiography. The waves travel through the specimen and get attenuated depending on the density and the detector transfers the waves into a greyscale image. Ranges with high densities, like sound wood, may appear brighter than low-density ranges, such as rotten wood. Figures 3.3b and 3.3c show the radiograph and the photograph of a tree disc with heart rot (the decay is darker). Figure 3.3d illustrates the test specimen as a radiograph. The image has a high resolution, i.e. knots and earlywood and latewood can be differentiated. The depth of the drillings can be determined by the computer by the gray value analysis. There is a high contrast between sound wood and drillings, and it is not possible to see the differences between the respective drillings in the figure. Potential applications for radiography are:

- identification and mapping of biological deterioration [Wedvik et al. 2016];
- detection of metallic inclusions, e.g. nails, threaded rod [Hasenstab and Redmer 2016];
- detection of moisture differences [Hasenstab 2006];
- differentiation of various densities like softwood or hardwood, early wood or late wood and knots [Osterloh et al. 2006].

An advanced variation of radiography is the computed tomography. This technique provides 3D information about the internal structure of wood by shooting several images in different angular directions and the geometrical reconstruction of the situation occurs via computation. The best-known approaches in this context are simultaneous iterative reconstruction technique and synthetic aperture focusing technique (SAFT), which are already implemented in commercial instruments for log assessment [Guddanti and Chang 1998]. Due to the 3D approach, a precise positioning of defects and decay is possible. There are attempts to apply this technique in reflection mode [Kolkoori et al. 2015]. A problem is the safety aspect of radiography for the operator. A safe distance and X-ray exposure monitoring via pocket dosimeter are strictly needed.

### 3.1.3.2 Stress waves, sonic stress wave tomography

The assessment of wood via stress wave is one of the oldest and simplest methods available. The original form is called sounding, in which the timber is struck with a hammer and the evaluated response of the generated sound enables us to draw conclusions on the physical conditions of the specimens. The results are not fully independent from the subjective perception of the operator. Only serious decay can be observed; initial wood decay and intermediate degrees of decay cannot be detected [Kasal and Tannert 2011].

An advanced version of this method is the sonic stress wave technique. Time of flight (TOF) measurement of the waves traveling through the medium, and attenuation of induced stress waves are the most important parameters. Like in the case of sounding, the waves are initiated with a simple mechanical impact. One or two accelerometers are used to detect passing waves and record time measurements (Figure 3.4a). The propagation speed of impulses in wood correlates with the density and the modulus of elasticity, and also with the temperature [Xu and Wang 2014]. Wood decay increases the transmission time of stress waves, which can be up to three times more than that in undamaged specimens [White and Ross 2014].

Sonic stress wave tomography is widely applied in building inspection, but it has some limitations. A single-pass stress wave measurement can only detect internal decay that is greater than 20 % of the total cross-sectional area [Wang et al. 2004]. Therefore, several measurements are needed to be able to detect defects in the entire object. Tomography is performed by means of a set of sonic probes, which functions both as a signal emitter and receiver (Figure 3.4b, c). In general, access to both sides of the timber is required. Hammer heads (weight and material) to initiate the waves in various materials are influential on the wave frequency. Applications of sonic stress wave tomography:

- the assessment of wood decay in structures [White and Ross 2014; Yang et al. 2017] and the condition of poles [Dackermann et al. 2015; Krause et al. 2015];
- determination of the geometry of the structure [Ross 1992].

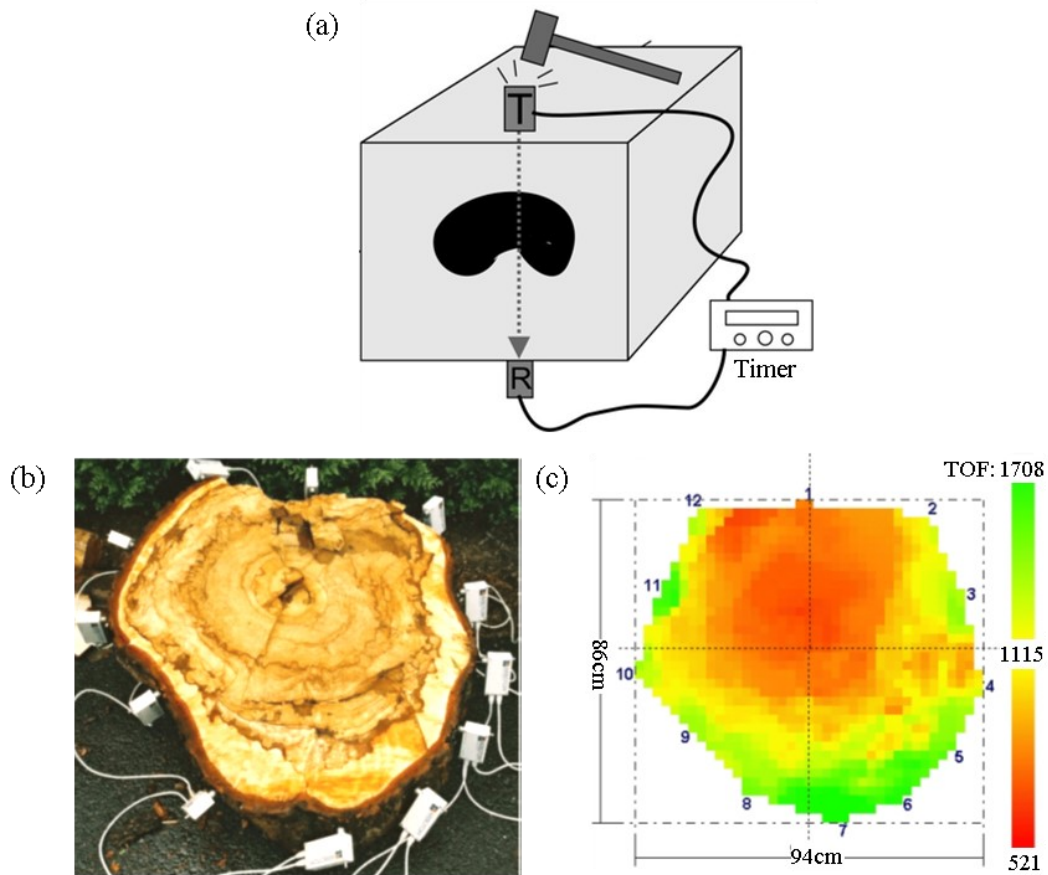


Figure 3.4: Principal setup for stress wave measurements in transmission mode (a). Photo of a tree disc with heart rot and 12 sensors (b). TOF-Tomograph with multiple stress wave measurements [Rinn 2003] (c).

Sonic stress wave tomography is well suited to check large timbers on-site with a limited resolution [Dackermann et al. 2014]. The equipment costs are low, and the experimental efforts needed for the performance are not high. The research in this field is quite advanced and the technical development of the instruments is high. Measurements of sonic stress wave tomography and ultrasonic techniques have great similarities and give rise to similar results [Nowak et al. 2015].

Historically, ultrasonic (US) type NDT methods based on frequencies around 20 kHz and above were exclusively developed for sorting and grading of structural products [Sousa et al. 2013]. It was not until recently that these techniques, also known as elastic waves approach, were applied to wood inspection for existing structures in buildings. Elastic waves can be categorized depending on the wave propagation mode, i.e. the propagation can be either parallel (longitudinal) or perpendicular (transversal) through the wood. Transversal waves with polarization along the grain are particularly effective because they have similar velocities in all anatomic directions, especially in radial and tangential directions [Hasenstab 2006].

The ultrasonic techniques can be subdivided into two groups:

- the US echo technique is based on the reflection of a wave at a boundary, which can be external or internal, and which leads to TOF reduction (Figure 3.5a),
- the ultrasonic technique based on transmission measures the transit time of a wave through a component. Defects inside the wood increase the TOF because the wave is reflected by them and needs a longer travel distance. Access to both sides of the specimen is required (Figure 3.5b), but under ideal conditions the internal damages can be localized from the received signals.

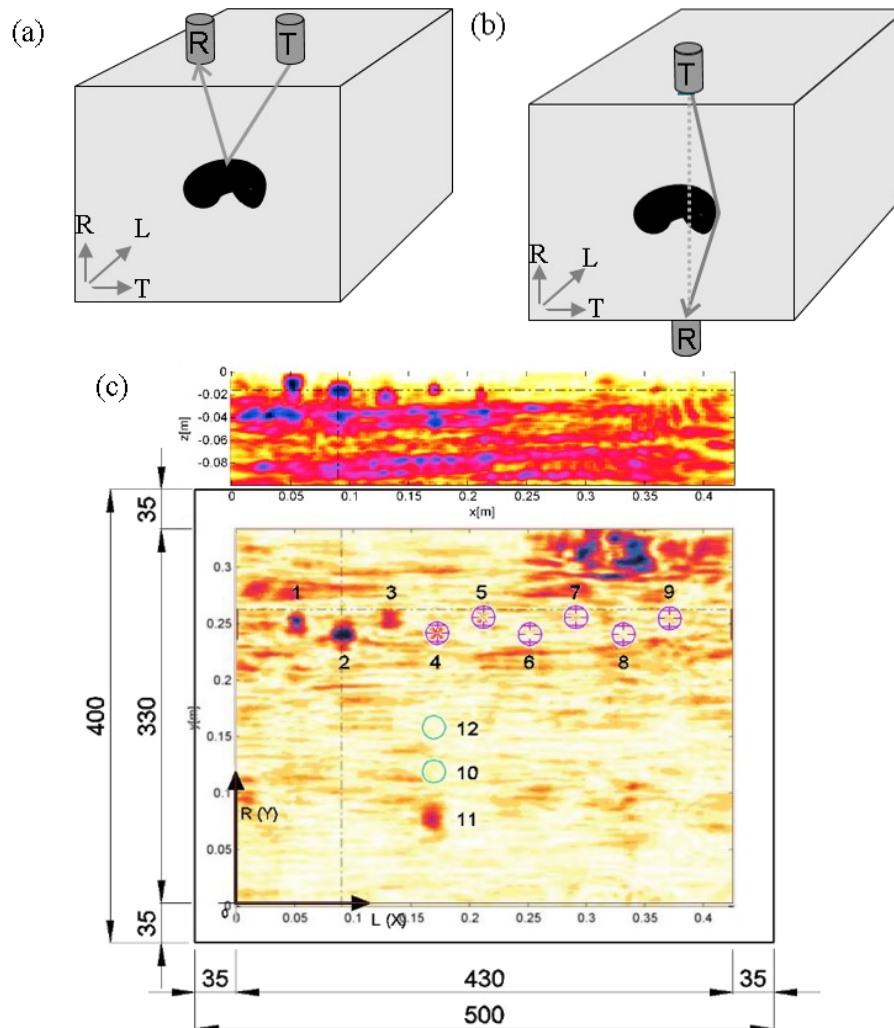


Figure 3.5: Principal setup for ultrasonic measurements in reflection (a) and transmission (b) mode. Ultrasonic imaging results with the device “Acscys A1220” and a 3D-SAFT-reconstruction in lateral view and top view (c) [Krause et al. 2014].

The advantage is that no radiation protection is necessary, but the detection resolution strongly depends on the wavelength of the generated waves. US is significantly influenced by the heterogeneity and anisotropy of wood. Unlike X-rays, US waves do not travel straightforward through the wood, because the waves are deflected by natural inhomogeneity such as the annual rings [Bucur 2005]. The moisture content and sensor positioning affect the propagation velocity and the results are also wood species dependent [Arriaga et al. 2017]. For

this reason, a computational editing of the data is crucial [Bucur 2003]. Reconstruction techniques, such as SAFT (for explication see Radiography) increase the analytical power [Bucur 2003; Krause et al. 2014]. Ultrasonic images can be reconstructed from all typical wave parameters such as amplitude, frequency, waveform, and phase. However, the most important parameter is the TOF. Various devices with single transducers are used for US measurements in the field [Nowak et al. 2015; Kloiber et al. 2016]. Other devices are based on arrays with multiple coupled transducers [Krause et al. 2014]. In the early 2000s, transducers with a coupling agent were replaced by dry couplings with piezoelectric sensors, so that fast screening experiments became possible [Shevaldykin et al. 2003]. Additionally, there are some attempts to utilize air-coupled transducers [Solodov and Busse 2006; Sanabria et al. 2011b]. Conic sensors have also been common for many years. These have the disadvantage of a long oscillation time of the impulse so that they can be only used in the transmission mode [Schmoldt et al. 1997]. The frequency of the transducers ranges between 25 and 100 kHz.

US methods in the low frequency range have been used in construction for many years. Piezoelectric transducers are particularly suitable for various purposes, such as for on-site inspection and analysis of existing structures [Tanasoiu et al. 2002]. Figure 3.5c shows the results of an US imaging measurement of the test specimen. The drillings 1–5 and 11 can be located very well because of their position near the surface. With increasing depth, the attenuation is increasing, too, so that the other drillings cannot be seen. Possible applications of US are:

- decay diagnosis of standing trees [Maia et al. 2014; Schickert et al. 2017], poles [Fernando Tallavo 2012] and structures [Hasenstab 2006; Lee et al. 2011; Mestre et al. 2013];
- detection of knots, grain deviation, cracks, voids and compression wood [Bucur 2003];
- determination of the geometry of the structure [Hasenstab 2006];
- delamination between layers [Bucur 2003].

US methods provide relatively fast and affordable localization of major defects in timber. The technique has a defined impact, and more parameters beyond TOF can be analyzed. US echo techniques allow for a direct localization of a reflector and can localize defects. They can be performed either in transmission or in reflection mode. The accuracy of US testing is still limited, if it is applied as the only method, because the anisotropy and heterogeneity of wood lead to inaccuracies and artifacts, such as a shift of defects in the images or insufficient resolution [Dackermann et al. 2014].

### 3.1.3.3 Radar

Radar as an NDT technique relies on microwaves, typically in the 1.2–3 GHz frequency range, and an ability to map timber structures and features. The Radar approach for the internal inspection of wood is relatively unusual. Most of the devices for material diagnostics originate

from geophysics and ground penetrating radar. Microwave pulses are sent into the object by means of an antenna moving along the surface. Signal analysis is related to the measurement of amplitude, phase and the polarization of the waves [Bucur 2003]. The most important parameter, though, is again TOF of a wave, which needs for covering a distance in the specimen.

Essential components are: an electromagnetic wave pulse generator, various antennas transmitting and receiving signals and a control unit for recording and processing signals. The operating principle is similar to the ultrasonic tomography discussed above, while transmission and reflection mode measurements are possible. *In situ*, the reflection mode is preferred, because one needs access to only one side of an object. The device generates a short pulse that travels through the material and back-scatters within a few nanoseconds. For a complete scan, a series of short pulses must be generated and composed to an image. Due to similar velocities in radial and tangential direction, the measuring direction has no importance [Martínez-Sala et al. 2013].

Wood is a dielectric and a slightly conducting material, permitting the propagation of electromagnetic waves. Microwaves are affected by moisture, fiber direction and wood density [Mai et al. 2014]. Figure 3.6a and 3.6b show a timber structure with a big mortise, knots and rot. Due to poor resolution in the corresponding Radar measurement, the hollow is more visible in contrast to the knots and the rot.

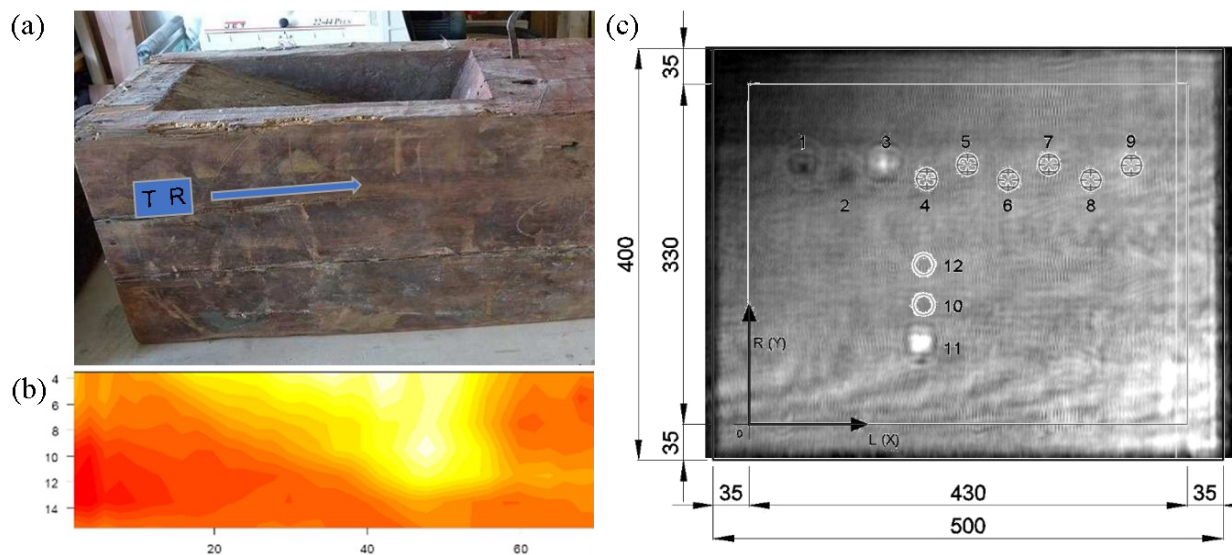


Figure 3.6: Timber structure with mortise (a). Radar image of the top-half part of the beam in lateral view; in mm (b) [Macchioni et al. 2013]. 80 GHz high frequency radar imaging result of the test specimen in a depth of 19 mm, top view (courtesy of Dr. Herschel, Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques) (c).

Recent research and our own tests have shown that very high frequency antennas (80 GHz) are able to locate defects in wood with high resolution [Demming et al. 2013]. The penetration depth is limited to a few centimeters only. Figure 3.6c shows data from a high frequency radar tomography of the test specimen with a similar result as the ultrasonic test. Only the drillings

1–3 and 11 can be located because of their position near the surface. The image shows a slice of the specimen in a depth of about 19 mm. That is the reason why only drilling 11 is sharp-edged as the drilling ends 19 mm below the surface. Measurements on the same specimen with a 2.6 GHz antenna enable only the imaging of the back-wall due to limited resolution. Possible applications of Radar:

- detection of metallic inclusions, e.g. nails, threaded rod [Hasenstab et al. 2007];
- determination of timber beams in ceilings [Lualdi et al. 2003];
- determination of decay, knots, and cracks in timber structures [Muller 2003; Macchioni et al. 2013];
- detecting moisture distinctions [Mai et al. 2014; Hans et al. 2015];
- decay assessment of trees [Schickert et al. 2017].

The Radar approach in the reflection mode can clearly highlight the presence of discontinuities inside wood. The technique enables a fast noncontact operation as well as a real-time interpretation and imaging of the data. Entire construction elements, such as wooden bridges and beams, can be scanned within a short time. The devices are relatively small and require no special safety arrangements due to harmless waves.

#### 3.1.3.4 Electrical resistivity

The electrical resistivity technique is a common method to determine moisture content in wood [Nusser 1936], however, its application for internal inspection is relatively new. Two electrodes are pricked into the timber and the resistivity between them is recorded, and the data are transformed to moisture content in percent. Conclusions on the condition of wood can also be drawn, if a ring array of needle electrodes is applied: pairs of electrodes are used for current introduction, others for voltage measurement. Variations in the pair locations serves for scanning the interior properties (Figure 3.7a) and based on the data, a tomogram can be calculated and evaluated. Electrical resistivity data permit the evaluation of the amplitude and the phase, which provide complementary information about a possible decay and the degree of the damage [Martin 2010].

The technique is sensitive to moisture content and electrolyte content, as well as to anisotropy. Several other factors, such as the type and age of the tree and even the season of a year seem to influence the results [Martin 2009]. Wood decay is often characterized by increasing moisture content and a changing electrolyte content. The electrical resistivity only produces results in case of high contrasts concerning the properties in focus. Therefore, trunks of living standing trees and trunk disks are especially suitable for inspection. Figure 3.7b and 3.7c show the electrical resistivity of a trunk disc. The grayscale image is indicative of the tree's integrity, while the damaged areas appear brighter than sound wood. To verify these results, resistance drillings were also performed. Various devices, such as the commercial PiCUS TreeTronic and



self-developed systems are used for *in situ* measurements. Possible applications of electrical resistivity:

- detection of moisture content [Nusser 1936];
- identification and mapping of biological deterioration of trees [Weihs and Krummheuer 1999; Al Hagrey 2006; Martin 2009] and test specimens [Pirto and Wilcox 1978].

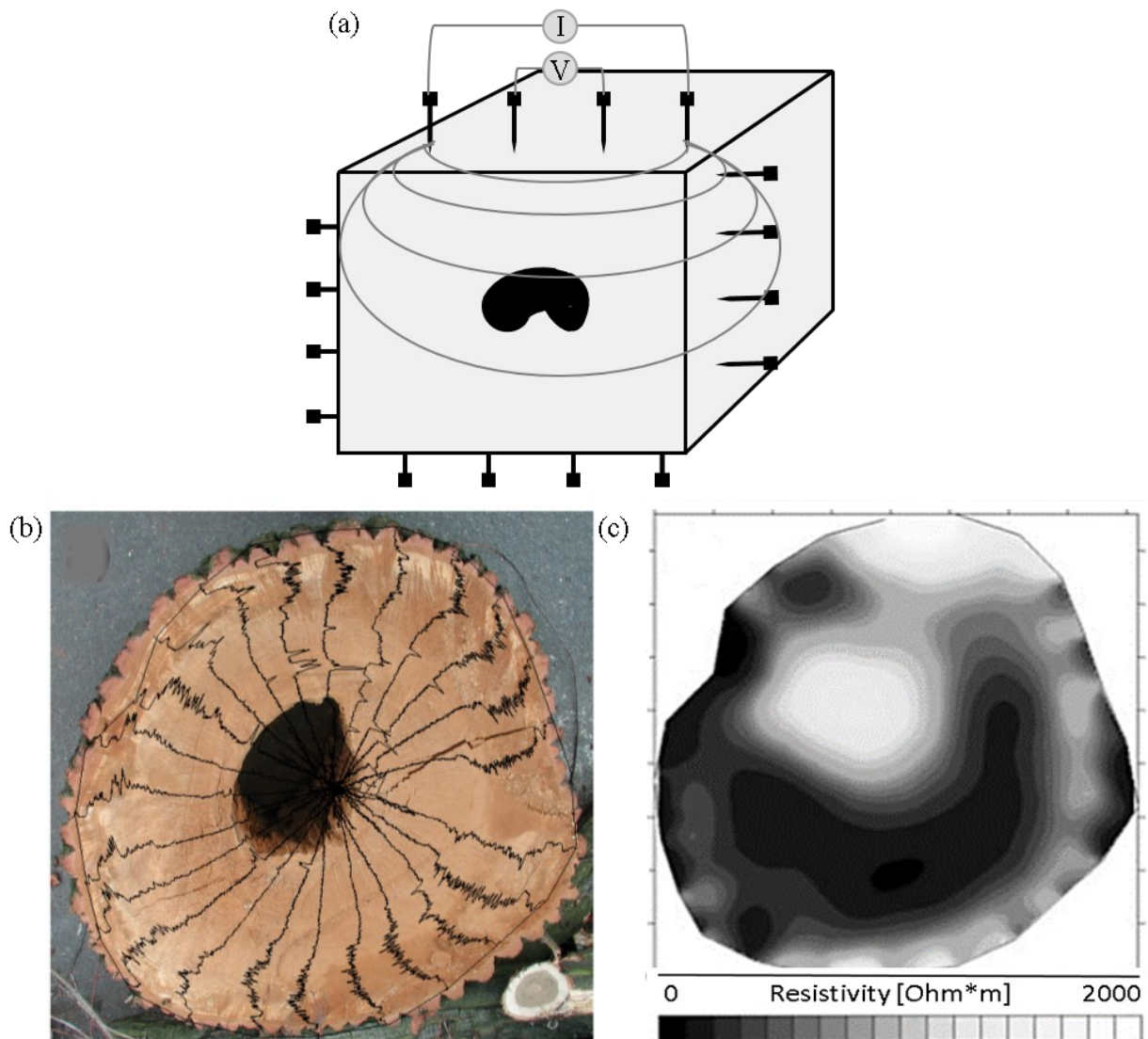


Figure 3.7: Electrical resistivity measurement and principal setup. Principal setup for electrical resistivity tomography (a). Photo of a trunk disc with drill resistance results (b) and resistivity tomogram of the fungi infected tree (c) [Martin 2009].

The electrical resistivity is promising for detecting internal defects. The assessment of the tomograms requires some experience because changing moisture content or electrolyte contents are not always referable to decay.

### 3.1.3.5 Drilling resistance

Drilling resistance assessment is a very common semi-destructive testing technique to locate internal decay and other damages. It is based on the drilling power input with a small diameter needle as a function of the covered distance. If the drill needle encounters a cavity or decayed areas, the power input decreases; hence the defect is visible on the drilling resistance profile as a minimum [Riggio et al. 2015]. In contrast, areas with high densities and sound wood increase the power input and lead to high values in the profile (Figure 3.8a).

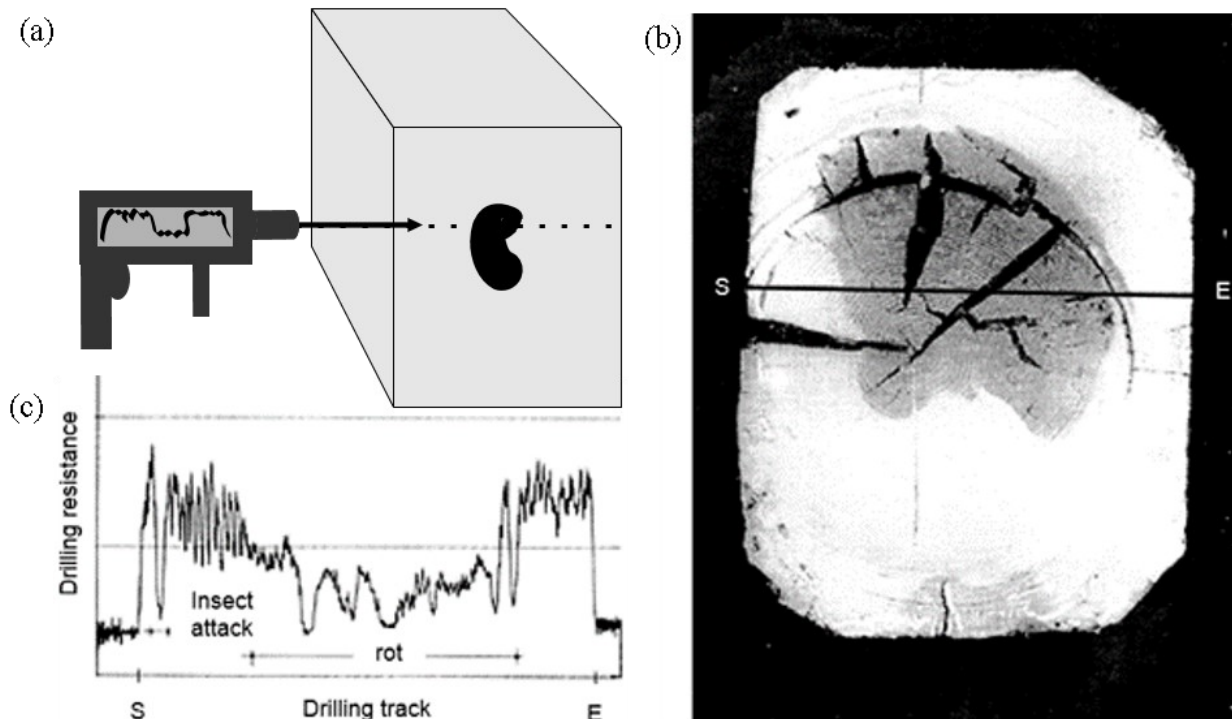


Figure 3.8: Principal setup for the drilling resistance measurement (a), wooden beam with marked drilling track (b) and the diagram of the drilling resistance (c) [Görlacher and Hättrich 1990].

The drilling needle has a diameter of up to 3 mm so that little damages are caused. Figure 3.8b and 3.8c show a drilling resistance profile of a beam cross-section and the corresponding diagram. Insect attack and rot have damaged the beam partially. In these sections, the drilling resistance drops to a minimum.

There are various devices such as IML-Resi and RESISTOGRAPH used for *in situ* measurements. Appropriate applications for drilling resistance [Hasenstab 2006]:

- distinction of late wood and early wood;
- detection of knots, cracks and splits;
- detection of decay and insect attack;
- determination of the geometry of the structure.

The drilling resistance assessment is very accurate and detects relative alteration in timber structures. Nevertheless, it is a local test and findings should not be generalized for larger areas. A quantitative assessment is only possible at the direct spot of the drilling. The approach is well suited for verification of large-scale results obtained by other methods. A good approach is to scan a large section with one of the NDT techniques and to examine the defective areas with the drilling resistance method [Hasenstab 2006]. The results are influenced by the moisture content, drill bit sharpness and angle and direction of drilling [Nowak et al. 2016]. Small defects and incipient decay are scarcely detectable.

#### 3.1.4 Combination of different methods

Most of the wave-based techniques have the limitation, that waves are totally reflected at a defect, e.g. cracks on or just below the surface in case of ultrasound. Therefore, areas behind these defects are not detectable. Another issue is that radiography produces only 2D images and the data are projected through the thickness into one plane. Therefore, the density data and images represent the average density of the timber through the thickness [Kasal and Tannert 2011]. A measurement should not be based on a single image, but on various images, preferably from different positions and directions.

The influence of anisotropy, heterogeneity and hygroscopicity is still a major challenge for NDT. When choosing suitable methods, the influence of these properties should be as small as possible or compensated by other techniques. The alteration of frequency and energy level is an opportunity of fine-tuning. With these parameters, the penetration depth and resolution are adaptable.

Ultrasonic tomography, Radar, and electrical resistivity techniques permit only qualitative analysis (Li et al. 2012), whereas complementary NDT/ semi-destructive testing techniques, like drilling resistance, should be utilized to obtain additional local quantitative information [Feio et al. 2007]. For this reason, the most reliable and complete results with an adequate accuracy can only be obtained through the application of several NDT methods simultaneously. For example, the use of ultrasonic waves can be combined well with drilling resistance for quantification [Hasenstab 2006; Wang and Allison 2008; Nowak et al. 2015; Riggio et al. 2015; Kloiber et al. 2016]. Large sections can be mapped with Radar and then verified at critical locations with radiography [Macchioni et al. 2013].

#### 3.1.5 Conclusion and outlook

There is a large arsenal of NDT and semi-destructive testing approaches to detect defects, damages, and decay in timber structures. Structures with high security demands such as bridges and housing require constant monitoring and assessment. NDT methods contribute a lot to this purpose but all of them have advantages and limitations. In an ideal case, several NDTs should be applied to obtain an adequate level of accuracy. NDT research should focus on the promising Radar and Air-coupled Ultrasound approach because of its fully unexploited application potential.

## Acknowledgement

The research work was subsidized by the Cusanuswerk, Episcopal Study Sponsorship. The authors would like to express their gratitude to Marcel Grunwald from the Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin and Reinhold Herschel from the Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques FHR, Wachtberg.

## 3.2 Air-coupled ultrasonic ferroelectret receiver with additional bias voltage

Published in *IEEE Transactions on Ultrasonics and Frequency Control*

Volume 66, 28.06.2019, Pages 1600-1605

<https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2925666>

Mate Gaal, Rui Caldeira, Jürgen Bartusch, Florian Schadow, Konrad J. Vössing and Mario Kupnik

© 2019 IEEE. Reprinted, with permission, from Mate Gaal, Rui Caldeira, Jürgen Bartusch, Florian Schadow, Konrad J. Vössing and Mario Kupnik, *Air-coupled ultrasonic ferroelectret receiver with additional bias voltage, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 10/2019

## Air-coupled ultrasonic ferroelectret receiver with additional bias voltage

### Keywords

Nondestructive testing, Ferroelectret, Ferroelectric materials, Acoustic sensors, Ultrasonic transducers, Ultrasonic imaging

### Abstract

High sensitivity is an important requirement for air-coupled ultrasonic sensors applied to materials testing. With a lower acoustic impedance than any piezoelectric material, charged cellular polypropylene (PP) offers better matching to air with a similar piezoelectric coefficient. The piezoelectric properties of charged cellular PP originate from their polarization, creating permanent internal voltage. The sensitivity of the sensor can be increased by applying additional DC bias voltage, as it has been done already for transmitters. This work presents the first ultrasonic sensor based on charged cellular PP including a high-voltage module providing DC bias voltage up to 2 kV. This bias voltage led to an increase of the signal-to-noise ratio of up to  $15\pm 1$  dB. The measurement of the received signal depending on the applied bias voltage is proposed as a new method of determining the internal voltage of ferroelectrets. The sensor combined with a cellular PP transmitter was applied to nondestructive testing of a rotor blade segment and glued laminated timber, enabling imaging of the internal structure of these specimens with a thickness around 4 cm.

### 3.2.1 Introduction

The high reflection coefficient for ultrasonic waves traveling in air and encountering a solid obstacle is the main challenge for the construction of air-coupled ultrasonic sensors. The reason for this high reflection is the low specific acoustic impedance of air compared to that of solids. When ultrasonic transducers (transmitters and receivers) are applied to air-coupled nondestructive testing of various structures, the ultrasonic wave needs to penetrate the object under test, losing a substantial portion of energy. In order to reduce the losses at the interface between the transducer and air, transducer materials with a low acoustic impedance are required. Such materials are ferroelectrets (also called piezoelectrets), which are a subtype of electrets defined as films of polarized or charged polymer foams, so that the polarization gives them piezoelectric properties. The most researched member of this family is charged cellular polypropylene (PP) [Sessler and Hillenbrand 1999; Bauer et al. 2004; Paajanen et al. 2000; Wegener et al. 2004; Mohebbi et al. 2016]. Due to its extremely low thickness component of the elasticity tensor  $c_{33}$  below 1 MPa at frequencies around 250 kHz [Gaal et al. 2016b] and its low density around  $300 \text{ kg/m}^3$ , its acoustic impedance of  $0.03 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  is significantly lower than the impedance of piezoelectric materials commonly used as transducers (e.g.  $30 \times 10^6 \text{ Ns/m}^3$  for PZT) while exhibiting a similar piezoelectric constant after corona charging (about 200 pC/N) [Zhang et al. 2004; Hillenbrand and Sessler 2008].

Cellular polypropylene ferroelectret is permanently polarized showing a corresponding internal voltage which makes it applicable as an electret microphone. Pressure applied to the surface of the film compresses it and generates voltage, which can be measured as an electric signal proportional to the thickness change of the film. Commercially available charged cellular PP film from the company EMFIT Ltd. has a thickness around 80 to 90  $\mu\text{m}$  and a resonance frequency around 700 kHz, so that this material is suitable as a sensor and as an actuator for nondestructive ultrasonic testing [Döring et al. 2012; Bovtun et al. 2007; Bovtun 2007]. For these purposes, it is provided with electrodes and glued onto hard backing. The hard-backing halves the frequency, whereas the electrode deposition decreases the resonance frequency further, so that it drops to frequencies between 200 and 300 kHz. Other applications include pickups for musical instruments and accelerometers [Hillenbrand et al. 2010]. Stacking several layers of charged cellular PP lowers the resonance frequency of the transducers [Wegener et al. 2005; Hillenbrand and Sessler 2004].

It has been demonstrated in some earlier publications on ferroelectrets [Hillenbrand and Sessler 2008; Hillenbrand 2014] that a bias voltage applied to a transmitter increases its sensitivity. Specifically, it has been reported in [Hillenbrand and Sessler 2008] that a bias voltage of 1500 V increased the effective piezoelectric coefficient  $d_{33}$  from around 400 to 1200 pC/N. In [Hillenbrand 2014] the effective  $d_{33}$  increased from 330 to 730 pC/N when 1000 V bias voltage was applied. However, a bias voltage has never been applied to ferroelectret receivers, which is possibly due to higher demands on the electric circuitry. Therefore, we present a sensor, i.e. a receiver, based on charged cellular PP with its sensitivity enhanced by the application of additional DC bias voltage.

### 3.2.2 Physical principles of ferroelectret receivers

In previous publications on ferroelectrets, the functioning of ferroelectret transducers was described within the concept of piezoelectricity. To analyze them as receivers, it is more helpful and simpler to start from the well-known functioning principles of capacitive microphones. In this section, we also point out the connection between these two concepts. A capacitive microphone works in a way that an impinging sound wave changes the distance between the plates of a capacitor. When a bias voltage  $V_{\text{bias}}$  is applied to that capacitor, for sufficiently small sound pressure levels the voltage variation

$$\Delta V = V^{\text{bias}} \frac{\Delta h}{h} \quad (6)$$

can be measured, where  $h$  and  $\Delta h$  are the distance between the plates and its variation, respectively. A ferroelectret receiver can be modelled as a capacitive microphone with a bias voltage  $V_{\text{bias}}$  equal to the internal voltage  $V_0$  caused by the ferroelectret polarization. The ratio  $\Delta V/\Delta h$  is a possible measure of sensitivity for ferroelectret receivers and, according to (6), it equals  $V_0/h$ , which is the internal electric field. The response of the receiver as described in (6) can be alternatively understood as a direct piezoelectric effect, assuming the stress strain relationship is linear. The direct piezoelectric effect is described by the relation  $Q = d_{33}F$ , where  $Q$  is the charge,  $d_{33}$  is the thickness component of the piezoelectric constant, and  $F$  describes

the force. Applying Hooks law and replacing charge with the product of capacitance and voltage leads to

$$\Delta V = \frac{c^{33}d^{33}}{\epsilon} \Delta h \quad (7)$$

where  $c_{33}$  is the thickness component of the elasticity tensor and  $\epsilon$  the permittivity of the ferroelectret. A comparison with 1 gives the relation between the internal bias voltage  $V_0$  and the piezoelectric constant  $d_{33}$ :

$$V_0 = \frac{c^{33}d^{33}}{\epsilon} h. \quad (8)$$

In the following, we will show that the same result can be obtained starting from the ferroelectret as a transmitter (as shown in [Sessler and Hillenbrand 1999]). The thickness change of a ferroelectret transmitter is proportional to the applied electrostatic force, which is the attractive force between two capacitor plates. This force equals  $\epsilon E^2/2$ , where  $E$  is the applied electric field consisting of the contribution of the internal voltage  $V_0$  and of the externally applied voltage  $V_t$ , so that  $E = (V_0 + V_t)/h$ . For a linear stress-strain relationship, the voltage initiates transmitter thickness changes proportional to the force, so that we obtain

$$\Delta h_t = \frac{\epsilon}{2c_{33}h} V_t^2 + \frac{\epsilon V_0}{c_{33}h} V_t + \frac{\epsilon V_0^2}{2c_{33}h}. \quad (9)$$

The second term represents the piezoelectric response of the ferroelectret:

$$\Delta h_t = d_{33} V_t. \quad (10)$$

Equating the second term in (9) with (10) leads to the same relation as (8). The sensitivity of the ferroelectret receiver  $\Delta V/\Delta h$  can be enhanced by applying external voltage  $V_{dc}$  additionally to the internal voltage  $V_0$ , to increase the measured signal, so that the total bias voltage becomes

$$V_{bias} = V_0 + V_{dc} \quad (11)$$

and (6) becomes

$$\Delta V = (V_0 + V_{dc}) \frac{\Delta h}{h}. \quad (12)$$

If the ferroelectret transducer is applied to record sound pressure, a more suitable measure of sensitivity would be  $\Delta V/\Delta p$ , where  $\Delta p$  is the sound pressure. If we apply the Hookes law and combine it with (6), we obtain  $\Delta V/\Delta p = V_{bias}/c_{33}$  for the sensitivity of the ferroelectret sensor.

### 3.2.3 Equipment and experiment

We have developed a high-voltage module to provide bias voltage  $V_{dc}$  in the range from -2000 to +2000 V. This module was combined with a previously developed module containing charged cellular PP with electrodes and a module with a low noise preamplifier (Fig. 3.10) [Gaal et al. 2016a].



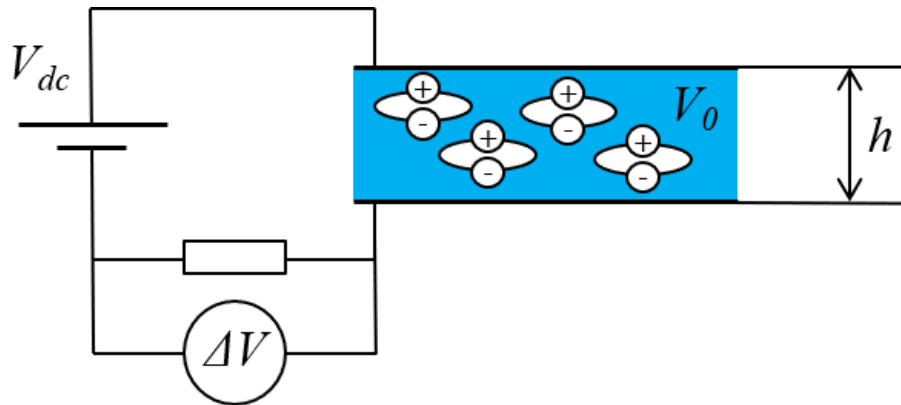


Figure 3.9: Cellular polypropylene films have flat voids providing low acoustic impedance closer to air than most other materials. The charge is trapped at the surfaces of the voids creating quasi-permanent polarization equivalent to a voltage  $V_0$ .

The preamplifier has a high input impedance of about  $1\text{ G}\Omega$ , which is sufficient concerning the output impedance of the ferroelectret transducer, which is between  $1$  and  $10\text{ M}\Omega$ . The capacitance of a single-layer ferroelectret transducer is about  $80$  to  $100\text{ pF}$ . The electric circuit of the bias voltage module contains elements as shown in Fig. 3.10, which are described as following: The bias voltage is contacted with the polarity as indicated in Fig. 3.9. A high-value resistor with  $2\text{ G}\Omega$  serves as short-circuit protection in the case of an electrical breakdown. A  $1\text{ nF}$  capacitor serves as a decoupling element between the high-voltage power supply and the preamplifier. The transient voltage suppressor serves as an overvoltage arrester, which diverts the electrical signal to the ground when its voltage exceeds  $8\text{ V}$  to avoid damage to the preamplifier. The high voltage power supply is EMCO P20P, delivering up to  $\pm 2\text{ kV}$  with a maximum current of  $1\text{ }\mu\text{A}$  and a ripple of only  $100\text{ }\mu\text{V}$ . Low ripple is necessary to achieve a good signal-to-noise ratio.

Ferroelectret sensors with stacked layers were prepared by gluing up to four layers of charged cellular PP obtained from company EMFIT, product designation HS06-20-BR. The thickness layer is nominally  $70\text{ }\mu\text{m}$ , but between  $80$  and  $90\text{ }\mu\text{m}$  according to the manufacturer. They were glued with one surface onto a flat electrode using the cyanoacrylate adhesive “UHU Sekunden Alleskleber geruchsfrei easy”, available in Germany under the product number 46130. The second electrode made of  $100\text{ nm}$  thick aluminum was evaporated onto the opposite surface of the ferroelectret stack using electron beam evaporation. For each number of layers, three sensor specimens were prepared, giving a total of twelve specimens. The aperture of all specimens was  $19\text{ mm}$ . Frequencies below  $100\text{ kHz}$  are required for inspection of concrete because of the scattering on the grains, which increases with increasing frequencies. They also have advantages for the through transmission of thicker plates because lower frequencies have a higher transmission coefficient if one quarter of the wavelength in the plate is smaller than the plate thickness.

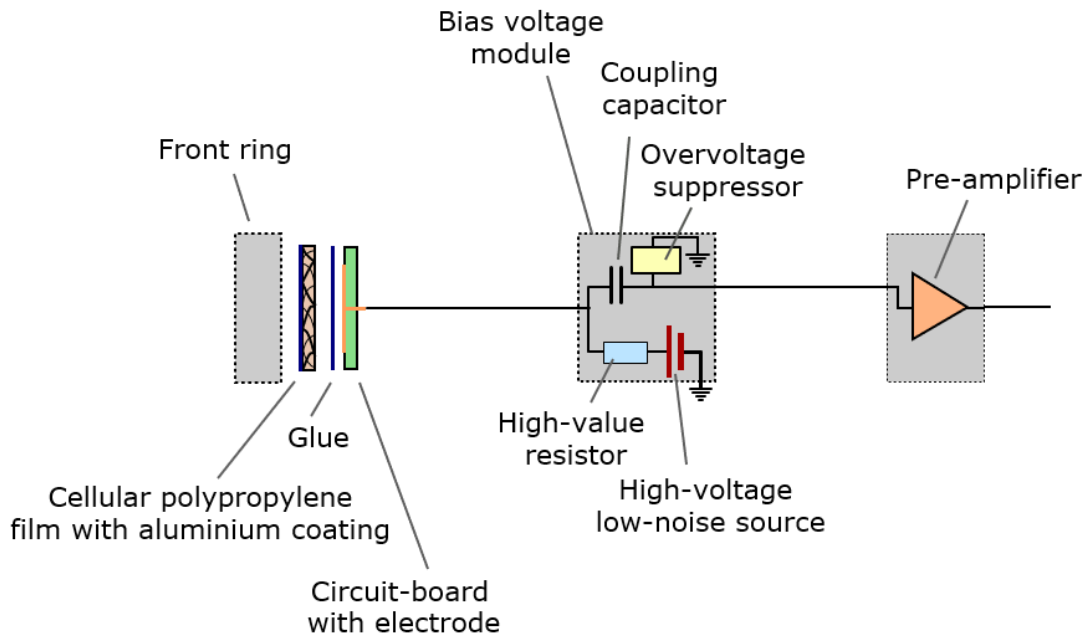


Figure 3.10: Receiver with a bias voltage module that adds external bias voltage  $V_{ac}$  to the existing internal voltage  $V_0$  of the ferroelectret film.

Three types of experiments were performed: through transmission in air, pulse echo measurements and through transmissions of test pieces. In the first type of experiment, the transmitting acoustical signal was kept constant, while the bias voltage at the receiver was varied. The transmitter was a thermoacoustic transducer, where a 100 nm thick titanium layer was deposited onto a PP substrate using electron beam evaporation. It was excited with an 80-V square pulse with a pulse length of 500 ns and placed 300 mm from the receiver. The working principle of thermo-acoustics is that electrical current heats up the electrode, the thermal energy transfers to the adjacent air and initiates a longitudinal sound wave [Daschewski et al. 2015]. A selection of four specimens of PP receivers were used, one specimen for each number of layers.

For the second type of experiment, a pulse echo measurement was performed with the same PP transducer as transmitter and receiver. These measurements were performed with all twelve available specimens using the air-coupled ultrasonic system USPC 4000 AirTech. The excitation was a square pulse with 200 V amplitude and pulse length adjusted to the resonance frequency  $f$ , that means equal to  $1/(2f)$ . No bias voltage was used for receiving.

In the third type of experiment, composite test pieces were inspected in through transmission using a pair of single-layer cellular PP transmitters, whereas the transmitter was applied without bias voltage and the receiver with bias voltage.

### 3.2.4 Results

The through transmission in air showed that the bias voltage of 2000 V increased the sensitivity of the single-layered sensor by 12 to 15 dB, as measured on three specimens, while the noise level increased only by 1 dB. For one of the single-layer specimens, this is shown in Fig. 3.11

and Fig. 3.12. The measurements in through-transmission (Fig. 3.12) confirmed the linear relationship between the received signal  $\Delta V$  and the bias voltage  $V_{dc}$ , as predicted in (12) [Gaal et al. 2017]. If the bias voltage cancels the internal voltage,  $V_{dc} = V_0$ , then the sensor is rendered insensitive. This can be used to determine the internal voltage as the intercept of the fitted straight lines. The measurement results from Fig. 3.12 were subjected to a regression analysis, with the following results: For the single-layer PP based sensor, the internal voltage was 473 V with  $\pm 16$  V tolerance, for stacked layer sensor with two layers 1261 $\pm$ 25 V, for three layers 2186 $\pm$ 29 V, and for four layers 3233 $\pm$ 56 V (Fig. 3.13). The values for the tolerance are results of regression analysis for a single specimen. The bandwidth was measured to be around 20 % and it did not change significantly with the application of bias voltage. The change of the resonance frequency due to bias voltage was less than 2 % with no recognizable trend.

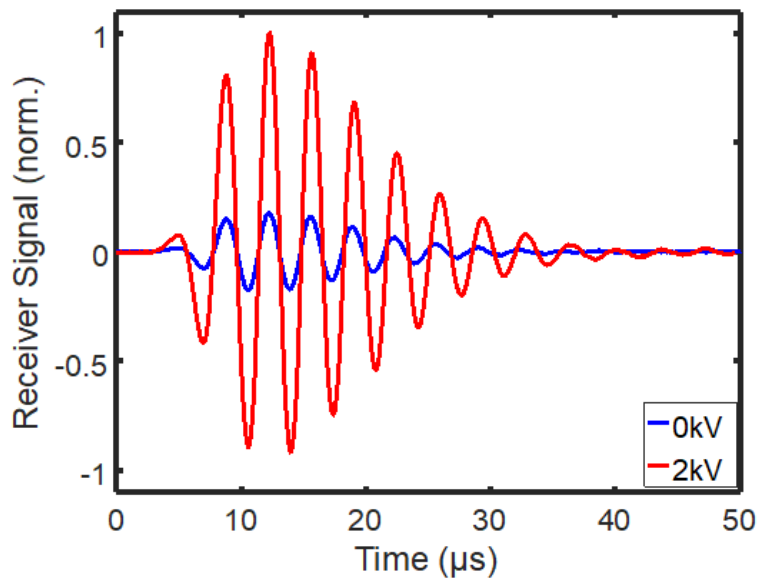


Figure 3.11: Receiver signals with external bias voltage  $V_{dc}$  of 0 V (blue) and 2000 V (red).

The slope of  $\Delta V$  versus  $V_{dc}$ , as described in (11) and shown in Fig. 3.12, is equal to  $\Delta h/h$ , the effective dynamic strain of the sensor. The term “effective” should be used because the measured signal is a result of the average thickness change over the entire aperture, while cellular PP is strongly inhomogeneous. Regression analysis on the measured values gives the result 369 $\pm$ 4, 322 $\pm$ 5, 152 $\pm$ 2 and 75 $\pm$ 1 ( $\times 10^{-6}$ ) for sensors with 1, 2, 3 and 4 layers, respectively (Fig. 3.13). If we take 85  $\mu\text{m}$  as an approximate average value for the thickness  $h$  and multiply it with the strain, we find that the approximate effective dynamic thickness change of the receivers in our experiment was between 25 and 54 nm. This is not to be confused with the static thickness change due to bias voltage, which is much higher. The static thickness change can be calculated from (9) if we substitute the bias voltage  $V_{dc}$  for  $V_t$  but having in mind that the elasticity tensor component  $c_{33}$  is frequency-dependent. Measurements on cellular PP samples without electrodes [Gaal et al. 2016b] gave the result of 0.04 MPa for the static case. This gives us the thickness change due to  $V_{bias}$  equal to 9  $\mu\text{m}$ , external voltage  $V_{dc}$  contributing by 7.5  $\mu\text{m}$  and internal voltage  $V_0$  by 1.5  $\mu\text{m}$ , which is a strain of about 10 %. This value cannot

be directly transmitted to PP transducers because the deposition of electrodes likely has some influence on the mechanical properties of cellular PP, but it gives us an approximate value for the strain of PP transducers.

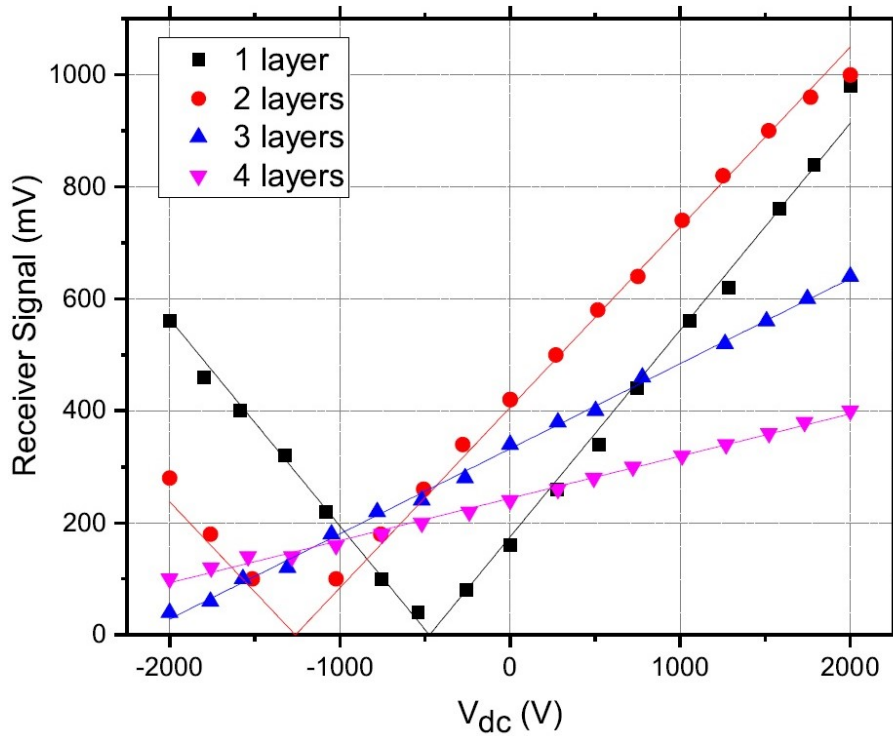


Figure 3.12: Peak-to-peak receiver signals versus external bias voltage  $V_{dc}$  applied to a ferroelectret receiver in a through-transmission experiment.

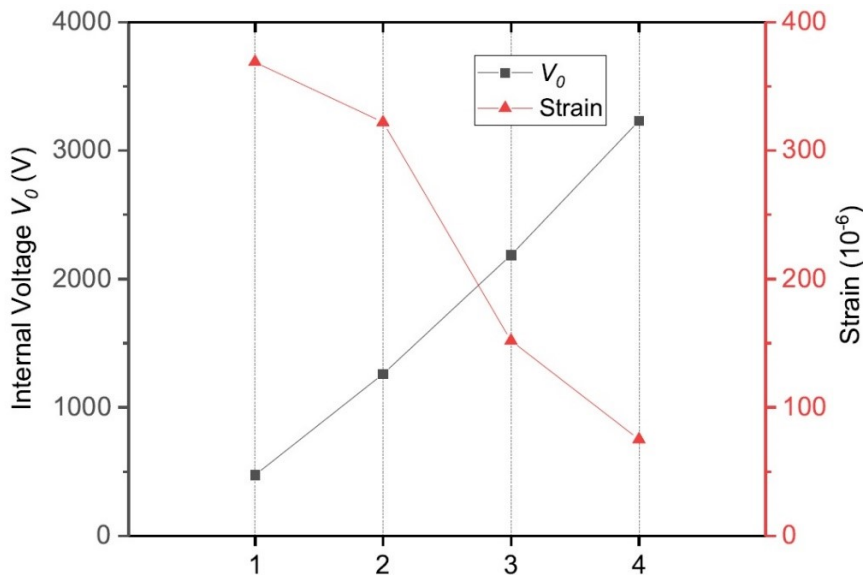


Figure 3.13: The internal voltage  $V_0$  and the strain of stacked layer ferroelectret receivers depending on the number of layers.

The pulse echo measurements show that the sensitivity of transducers drops with the number of stacked layers (Fig 5.6). These measurements were performed using three transducer specimens for each number of layers. The distance between the transducer and the reflective

wall was set to the focal distance of the respective transducer. The bars represent the 6dB bandwidth, which was measured to be  $(16 \pm 2)$  % of the resonance frequency. The resonance frequencies were  $(304 \pm 12)$ ,  $(150 \pm 2)$ ,  $(106 \pm 1)$  and  $(74 \pm 1)$  kHz for 1, 2, 3 and 4 layers respectively, as expected for resonances in thickness mode [Wegener et al. 2005; Hillenbrand and Sessler 2004].

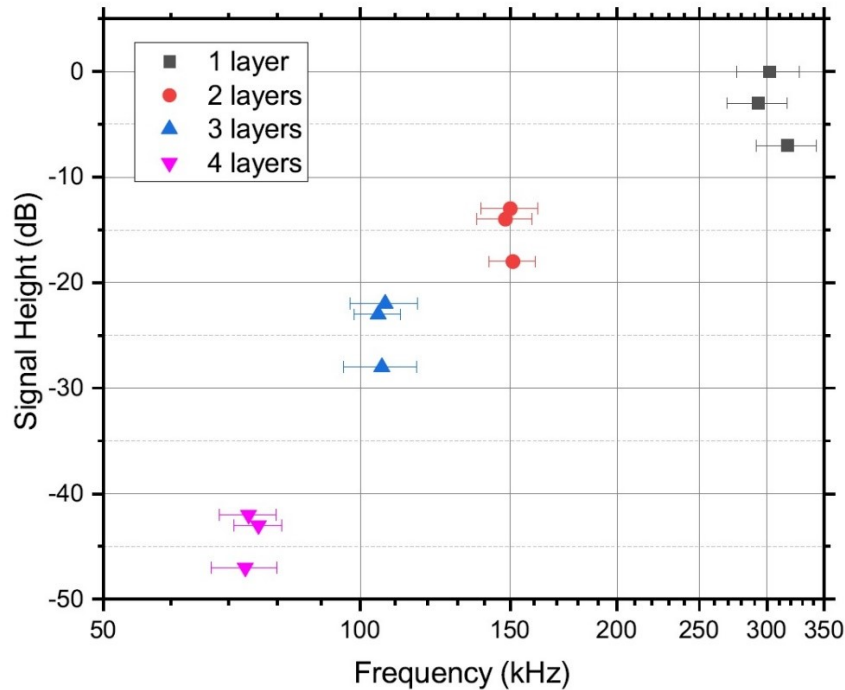


Figure 3.14: Results of a pulse-echo measurement of a reflection from a straight wall. The bars represent the 6dB bandwidth.

A possible application of these sensors in nondestructive inspection is shown in Figures 5.7 and 5.8. A test piece emulating a part of a rotor blade for wind turbines was inspected in ultrasonic transmission (Fig. 3.15). This test piece consists of a balsa core, epoxy resin as an adhesive between the balsa pieces and glass-fiber-reinforced epoxy laminates enclosing the wood. The thickness of the core was 18 mm and of each laminate 4 mm. The test piece was placed between the transmitter and the receiver, which were moved over the surface, and the signal height was evaluated (so called C-Scan), which is the usual application of air-coupled transducers. The transducers used for this inspection had an aperture of 19 mm, a curvature radius of 50 mm and a resonance frequency around 250 kHz. It has been shown earlier [Gaal et al. 2016a] that these transducers can detect elongated inserts with a width of only 1 mm in 4 mm thick plates even without applying external bias voltage. If applied for a few hours, the external bias voltage  $V_{dc}$  of 2 kV sometimes causes an electrical breakthrough on single-layer transducers, which causes local damage to the transducer. Therefore, inspection was performed using external bias voltage of 1.6 kV, without occurrence of breakthroughs. Inspection in transmission reveals the internal structure of the wooden blocks and their connections. Transmission of some wooden samples have shown that the signal-to-noise ratio of ferroelectret PP transducers is about 6 dB higher than of commercially available transducers [Vössing et al. 2018].

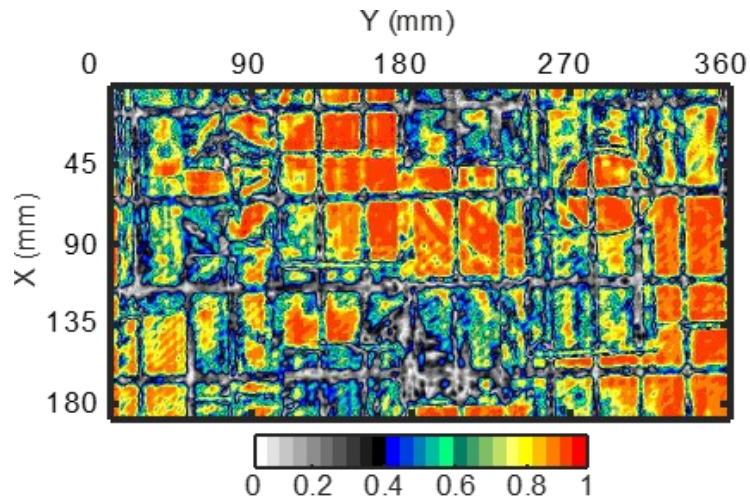


Figure 3.15: Results of a through-transmission inspection of a section of a rotor blade for wind turbines, using ferroelectret transducers with external bias voltage. The color represents normalized signal height.

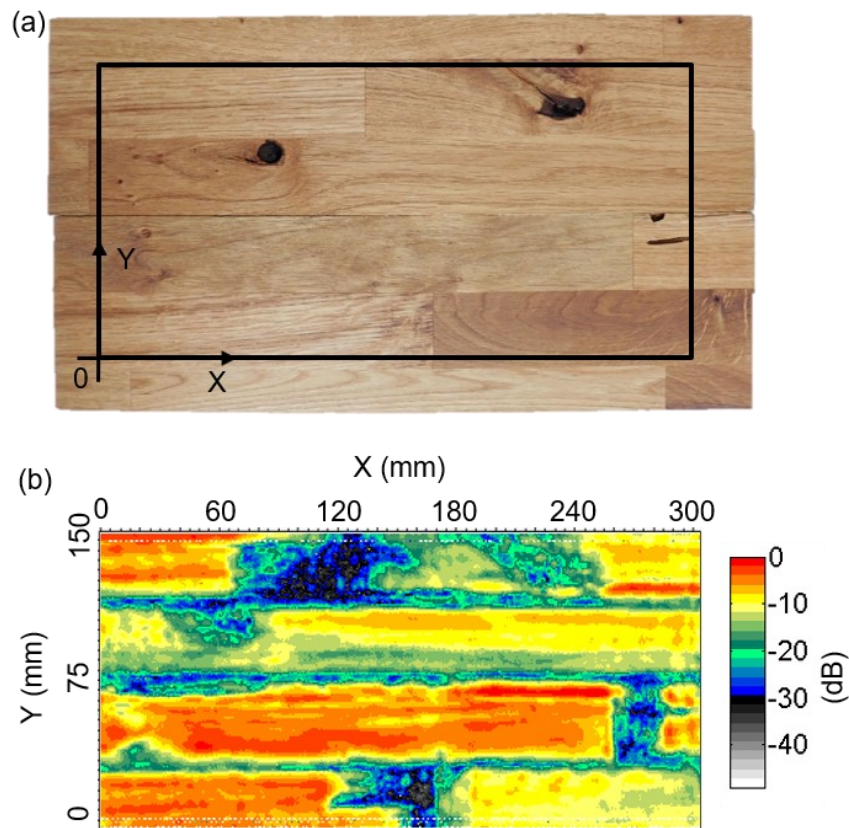


Figure 3.16: Glued laminated timber with indicated area of inspection (a) and inspection results, using ferroelectret transducers with external bias voltage (b). The color indicates normalized signal height.

The second ultrasonic transmission measurement (Fig. 3.16) was performed using a self-build test specimen out of common oak with dimensions  $370 \times 210 \times 38 \text{ mm}^3$ . The glued laminated timber is composed of several square timbers stuck together (Fig. 3.16a). The experimental setup was the same as for the rotor blade section (Fig. 3.15), but with external bias voltage of 1.8 kV, with no breakthroughs during the inspection. Single-layer transducers were applied

with an aperture of 27 mm, a spherical curvature radius of 50 mm and a resonance frequency around 200 kHz. The glued joints of the panel can be located (Fig. 3.16b), as well as knots (e.g. at  $x = 70$ ,  $y = 110$ ) and an insect attack (at  $x = 280$ ,  $y = 60$ ).

### 3.2.5 Discussion and conclusion

The dependence of the received signal on the external bias voltage  $V_{dc}$  can be used for the characterization of ferroelectret transducers. By evaluating that dependence, we can determine the internal voltage, which is an important parameter defining the sensitivity of the ferroelectret receiver. Reading the value of the intercept, where the received signal drops to zero (or below the noise level), provides us a quick method to estimate the internal voltage.

The measurements on multilayer transducers indicate a deviation from an ideal multilayer transducer. Ideally, the internal voltage  $V_0$  would grow proportionally with the increasing number of PP layers. However, it grows faster than proportionally. This indicates that the internal voltage varies from layer to layer within the same transducer. The reason for this might be in the technology of preparation of multilayer transducers. The layers were glued together before the electrode was deposited on the outer layer. It is possible that the electrode deposition lowers the sensitivity of the outer layer due to thermal load. The gluing also reduces the sensitivity, as shown in Fig. 3.14. Ideally, the thickness change alone would not affect the measured signal height, but the adhesion between PP layers introduces additional mass which decreases the effective dielectric constant. The reduction of strain with the number of layers shown in Fig. 3.13 has several causes. Not only the construction of the sensor, but also the frequency dependence of the sound field affects the sound pressure at the receiver, so that the measured changes in strain cannot be easily compared. With an increasing number of layers in a sensor, the internal voltage increases, so that the applied bias voltage  $V_{dc}$  would also need to be increased to achieve the same increase in sensitivity as with single-layer sensors.

The assumption of linear stress-strain relation is a strong one, given the cellular structure of the ferroelectret, the low elastic constant and the large strain due to bias voltage. Indeed, it has been shown (Figure 12 in [Gaal et al. 2016b]) that the measured dynamic strain (as a response to a sine-wave excitation) and thus the elasticity component  $c_{33}$  is strongly influenced by the static strain in the frequency range up to 33 Hz. However, the measurement results from this article imply that the elasticity is not affected at the frequency around 250 to 300 kHz, which is the resonance frequency of transducers. The first evidence is the linearity of curves shown in Fig. 3.12, the second one is the independence of the resonance frequencies on the bias voltage, which would increase with an increasing  $c_{33}$ .

The implementation of additional bias voltage to ferroelectrets leads to an extremely sensitive ultrasonic transmission system for nondestructive testing. This opens new possibilities for inspection of thicker components and components with higher damping and for transmission of signals to higher distances. This includes higher distances in air, as well as propagation of guided waves. Applications beyond nondestructive testing are also possible, for example

microphones for the ultrasonic range. Further studies are necessary to investigate possible applications in audible range.

### Acknowledgment

We would like to thank Uwe Beck from BAM for the electron beam evaporation, Matthias Goldammer at Siemens for providing the rotor blade section, Sunav Dutta from BAM for his help with transducer characterization and Daniel Kotschate from BAM for his help with the formatting of images.



### 3.3 Air-coupled ferroelectret ultrasonic transducers for nondestructive testing of wood-based materials

Published in the journal Wood Science and Technology

Volume 52, 19.09.2018, Pages 1527-1538

<https://doi.org/10.1007/s00226-018-1052-8>

Konrad J. Vössing, Mate Gaal and Ernst Niederleithinger

## Air-coupled ferroelectret ultrasonic transducers for nondestructive testing of wood-based materials

### Keywords

Air-coupled ultrasound, Cellular polypropylene, Defect detection, Nondestructive Testing, Wood-based materials

### Abstract

Air-coupled ultrasound (ACU) is used in through transmission to detect delamination, rot, and cracks in wood without altering the structure permanently. Novel ferroelectret transducers with a high signal-to-noise ratio (SNR) enable a high-precision structure recognition. Transducers made of cellular polypropylene (PP) are quite suitable for ACU testing due to their extremely low Young's modulus and low density which result in a favorable acoustic impedance for the transmission of ultrasonic waves between the transducer and air. Thus, structures with great dimensions, with a thickness of up to 300 mm and material densities under 500 kg/m<sup>3</sup> can be inspected. Promising results were obtained under laboratory conditions with frequencies from 90 kHz to 200 kHz. The advantage of ACU transducers is that they do not require contact to the sample, are accurate, and cost effective. Ultrasonic quality assurance for wood is an important avenue to increase the acceptance of wooden structures and towards sustainability in civil engineering in general.

### 3.3.1 Introduction

The challenge for NDT is to identify deterioration in timber without altering the functional properties of the elements under investigation and to take appropriate measures to address any deficiencies. Many NDT and semi-destructive techniques such as drilling resistance, electrical resistivity, radar, radiography, sonic stress wave, and ultrasound have been examined to solve these problems [Riggio et al. 2015; White and Ross 2014; Vössing and Niederleithinger 2018; Ross and Pellerin 2002]

Often, damage to timber is caused by manufacturing errors or incorrect applications during its service life. Although visual inspection is often a helpful first step, one should focus on internal inspection, since most common flaws in timber include internal damage and discontinuities may be invisible on the surface despite significant internal damage [Nowak et al. 2016].

Currently, timber structures are experiencing a renaissance caused by attitudes to climate change and a growing emphasis on sustainable development. Since the use of wood in both existing buildings and in new construction is increasing, the need to examine them is also increasing. As more objects require monitoring and repair, an increasing effort must be placed on the assessment of such structures and products.

Besides conventional timber, wood-based materials (WBM) such as glued laminated timber (glulam), laminated veneer lumber (LVL), and plywood are becoming more common. This

engineered timber has an increasing stability and safety due to homogenization of the characteristic features of wood. Anisotropy and heterogeneity such as knots, annual rings and cracks hamper NDT because they interfere the propagation of ultrasonic waves [Hughes 2015; Bucur 2005].

NDT in wood technology can be applied during the production of WBM and during its service life. In both instances, there are several NDT techniques used but still there is huge potential for improvement. Therefore, a more powerful technology can be used to achieve better results with such products. It is important to analyze which materials and which kind of defects are relevant and must be detected prior to determining which NDT technique will be utilized. Common defects in practice leading to complaints and repairs are delamination, cracks, and branchiness [Bucur 2011].

Air-coupled ultrasound (ACU) avoids direct contact to the material. Like conventional ultrasound, ACU is non-hazardous, fast and cheaper than most other techniques. The contactless measurement can scan large areas within a short time. Especially in the manufacturing process of WBM in a continuous process, ACU makes an important contribution to a fully automated production [Hilbers et al. 2012a].

Various reviews have been published on this subject [Fang et al. 2017; Chimenti 2014; Buckley 2000]. Specific ACU techniques for wood were described by Sanabria [2012]; Solodov et al. [2004]; Hasenstab [2006]; Marhenke et al. [2018]. This paper presents nondestructive imaging based on a new type of ACU transducers focused on the internal inspection of wood-based materials in through transmission.

### 3.3.2 Manufacturer & technical details.

The inspection presented in this article was performed with air-coupled transducers based on charged cellular polypropylene (PP) [Paajanen et al. 2000; Wegener et al. 2004; Sessler and Hillenbrand 1999; Döring et al. 2012]. Charged cellular polymers are called ferroelectrets or sometimes piezoelectrets, because they are a type of electrets having ferroelectric and thus piezoelectric properties. Commercial charged PP films from the company EMFIT Ltd. have a nominal thickness of 70  $\mu\text{m}$  (actual thickness 80-90  $\mu\text{m}$ ), density of about 330  $\text{kg}/\text{m}^3$  and an extremely low Young's modulus of about 1 MPa at their resonance frequency [Gaal et al. 2016b], which is between 200 and 300 kHz when they are glued to hard backing, creating a more favorable acoustic impedance for the transmission of ultrasonic waves [Gaal et al. 2016a; Döring et al. 2012]. The impedance of  $0.03 \times 10^6 \text{ Ns}/\text{m}^3$  is significantly lower than the impedance of piezoelectric materials commonly used as transducers ( $30 \times 10^6 \text{ Ns}/\text{m}^3$ ) providing good matching to air, so that it requires no matching layers like conventional air-coupled transducers [Zhang et al. 2004]. Nevertheless, ultrasonic transducers are usually made from piezoceramic materials [Kunkle et al. 2006] and were used for ACU measurements before [Hasenstab 2006].

The ferroelectrets were compared with market-based piezoceramic transducers from the ULTRAN company. An attempt has been made to compare similar transducers from different companies (Tab 3.1).

Table 3.1: Comparison of ferroelectret and piezoceramic ACU transducers used for through transmission with information to frequency, focus and apparatus diameter

<b>Transducer</b>	<b>Frequency/ kHz</b>	<b>Focus/ mm</b>	<b>Apparatus diameter/ mm</b>
Ultran NCG200-D19	200	70	19
CPP 713 A19	200	69	19
Ultran NCT200-D25-P150	142	64	25
CPP 707 A27	130	63	27
Ultran NCG100-D25	100	49	25
CPP 709 A27	100	51	27

### 3.3.3 Experimental setup

Keeping in mind the hierarchical architecture of wood, the selection of the most relevant technique for structure imaging is, up to a certain point, directly related to the resolution required: the bigger the wavelength, the poorer the resolution of the objects [Bucur 2003]. However, parameters such as the distance between measurement points influence resolution as well. For this reason, different wavelengths were tried to find the proportion of resolution and penetration depth.

To start the measurements, the sample was placed between the transmitter and the receiver, which were moved over the surface in a meandering pattern, while displaying the signal height and the time of flight (TOF) of individual pulses as a composite image (so called C-Scan).

Cellular PP transducers differ in terms of frequency, apparatus diameter, and focusing. The utilized frequencies range from 90 kHz to 250 kHz, the apparatus diameter from 19 mm to 27 mm and the focusing from a radius of 0 to 50 mm [Gaal et al. 2016a]. Cellular PP transmitters were excited with 1.8 kV pulses, so that the electrostatic compression of this cellular material has a significant contribution to its vibration [Döring et al. 2012; Döring et al. 2010]. The receiver was connected to an earlier developed unit that can provide DC voltage up to 2 kV, which increases the sensitivity of the receiver (Fig. 3.17).

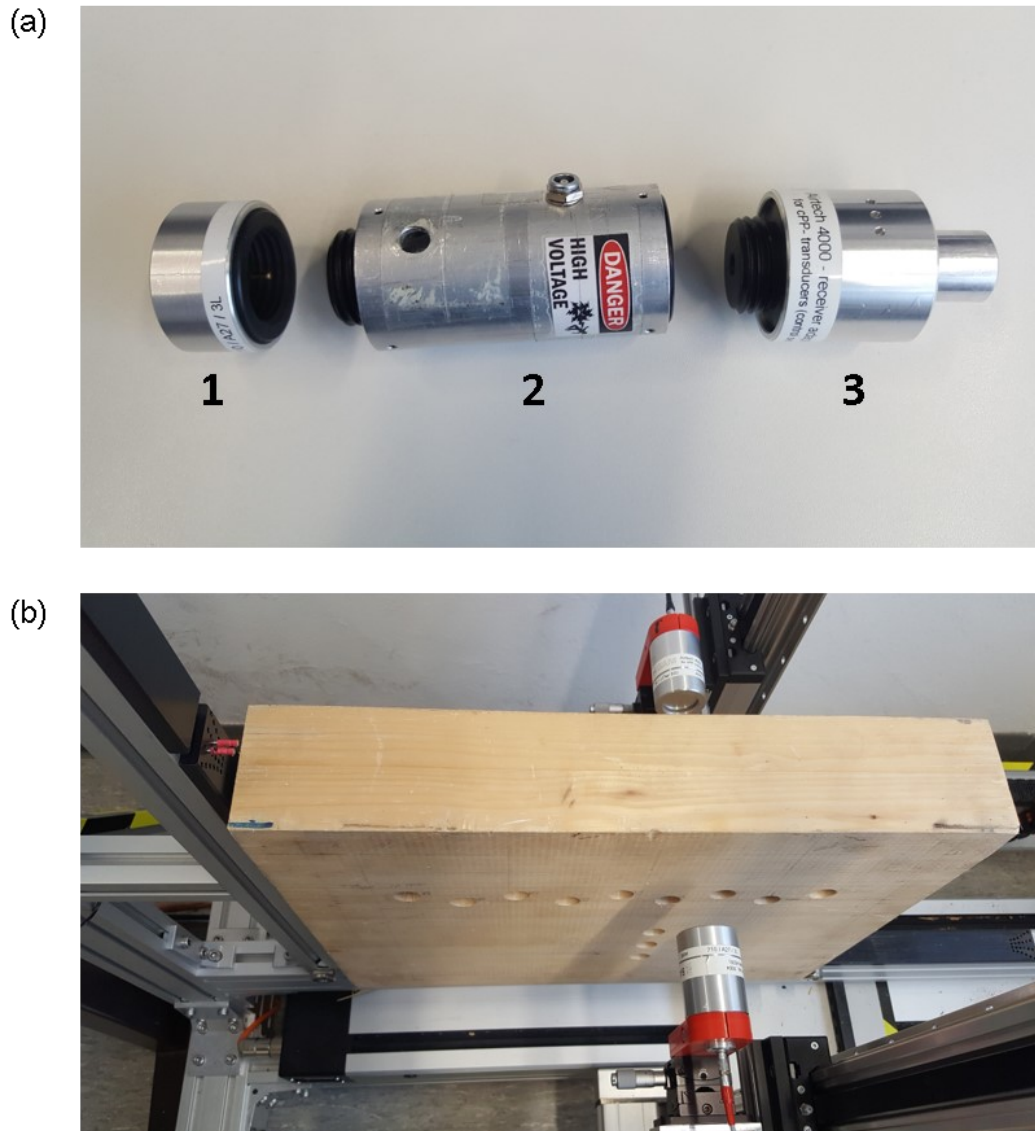


Figure 3.17: Cellular PP receiver for air coupled ultrasound . Connected in series is the PP transducer (1), unit providing additional DC voltage (2), and preamplifier (3) (a). Experimental setup in through transmission with spruce specimen and without the DC unit (b).

### 3.3.4 Test sample preparation

Various WBM were used as test materials to examine the new measurement technology. The samples were the most frequently used materials which must fulfill high safety requirements like glulam, LVL, and plywood. These products are composed of several layers of wood stuck together. The samples must be free from natural defects so that they do not distort the result. In addition, artificial defects such as wrong adhesives, drillings, and cuts were inserted to reference samples to show the potential of ACU for NDT (Tab 3.2).

Additionally, measurements on defect-free WBM were performed to determine the suitability for through transmission in general.

Table 3.2: Various test samples with information to material, dimensions &amp; building, defects, and setup

<b>Material</b>	<b>Dimensions &amp; Building</b>	<b>Defects</b>	<b>Setup</b>
<i>Glulam 1</i> , spruce (picea) Wood equilibrium moisture content: 9 % at 50 % rel. air humidity, 24°C Density: 470 kg/m <sup>3</sup>	500 x 400 x 90 mm <sup>3</sup> 16 square timbers	12 drilled holes with depths in a range from 10 mm to 50.1 mm and either blind holes or countersinks	Grid:1.05 mm Propagation direction: radial/tangential
<i>Plywood 1</i> , birch (betula) Wood equilibrium moisture content: 9 % at 50 % rel. air humidity, 24°C Density: 670 kg/m <sup>3</sup>	400 x 270 x 40 mm <sup>3</sup> 30 crosswise bonded veneers	11 defects (3 delamination, 6 drilled holes, 3 millings)	Grid:1.05 mm Propagation direction: radial/tangential
<i>Glulam 2</i> , spruce (picea) Wood equilibrium moisture content: 9 % at 50 % rel. air humidity, 24°C Density: 470 kg/m <sup>3</sup>	700 x 250 x 120 mm <sup>3</sup> 8 planks	Degradation by fungi (brown rot on the left site)	Grid:1.05 mm Propagation direction: radial/tangential

## 3.3.5 Results and discussion

Fig. 3.18 shows various measurements displaying the advantage of ferroelectret transducers in contrast to piezoceramics. The signals for various frequencies are up to three times higher than those from commercial transducers. The differences are especially significant for lower frequencies.

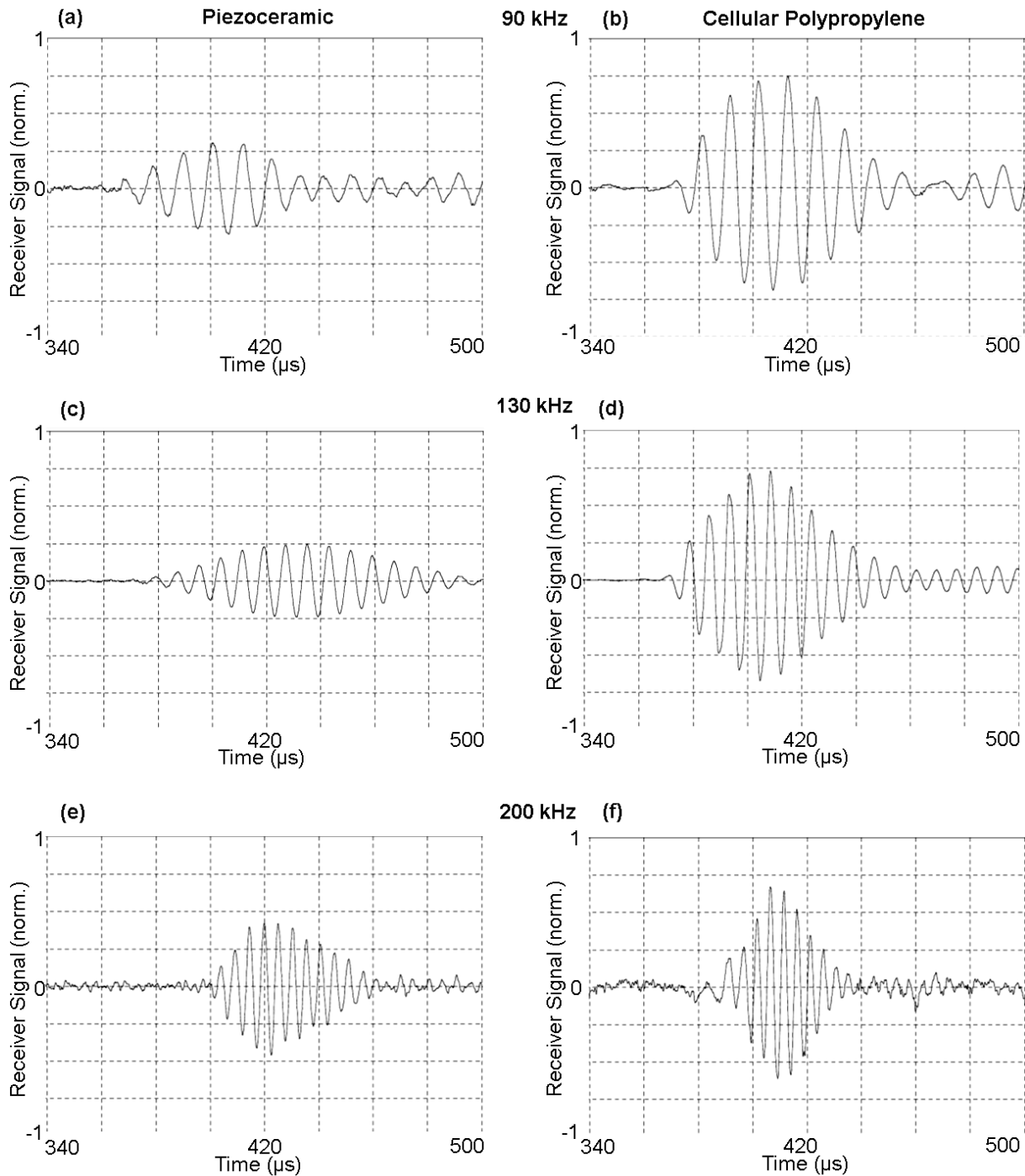


Figure 3.18: Comparison of piezoceramic and cellular PP transducers . The measurements were performed at the same position in through transmission using a self-built and defect-free test specimen equivalent to the specimen Glulam 1. Receiver signals with frequencies of 90 kHz (a-b), 130 kHz (c-d) and 200 kHz (e-f). The signals are normalized on the same noise level to compare the SNR.

Another ultrasonic measurement was performed using the test specimen Glulam 1. The specimen was developed to increase the comparability of various transducers concerning resolution, penetration depth, and applicability (Fig. 3.19). The measurements compare various transducers with different frequency. The measurement shows two C-Scans with frequencies of 200 kHz in Fig. 3.19e and 90 kHz in Fig. 3.19f. The images show the time of flight with light grey color for fast and dark color for slow transmission. The holes reduce time of flight because of the slower acoustic velocity in air. Both images have a high resolution, i.e. by means of attenuation the individual square timbers can be differentiated and the depth of the holes can be determined by the grey value analysis. Nevertheless, the resolution on the left side is better: the holes of the imaging result follow the specimen more precisely. The difference between blind holes or countersinks cannot be distinguished in either case.

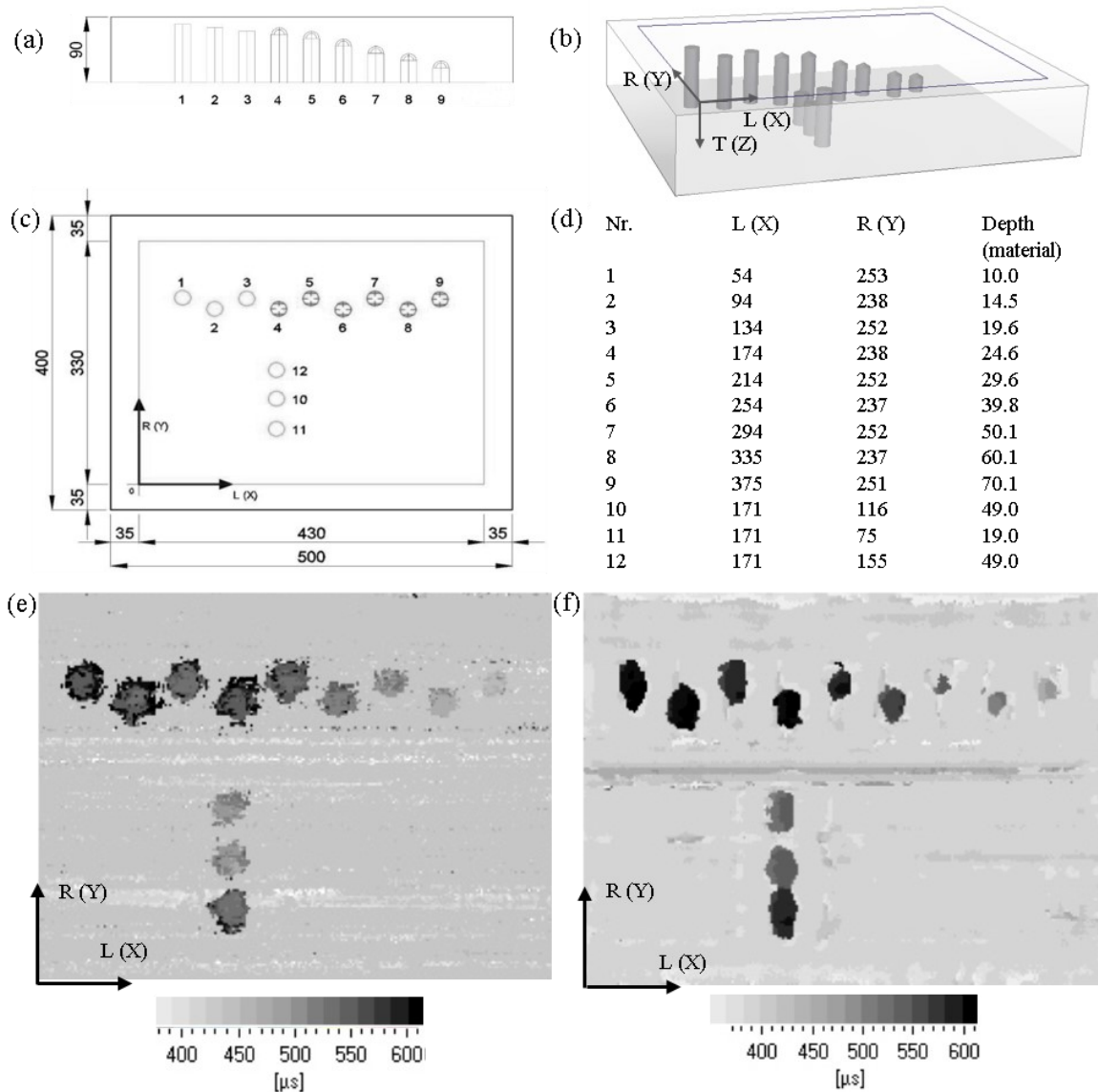


Figure 3.19: Principal setup of the specimen Glulam 1 with 12 test-drillings on the bottom in lateral view (a), top view (b) and 3D view (c). The coordinate system shows the measuring field. Location information of the 12 drillings and their depth, in mm can be taken from the tabular data (d). Ultrasonic imaging results with frequencies of 200 kHz (e) and 90 kHz (f). The measurement shows the time of flight in  $\mu\text{s}$



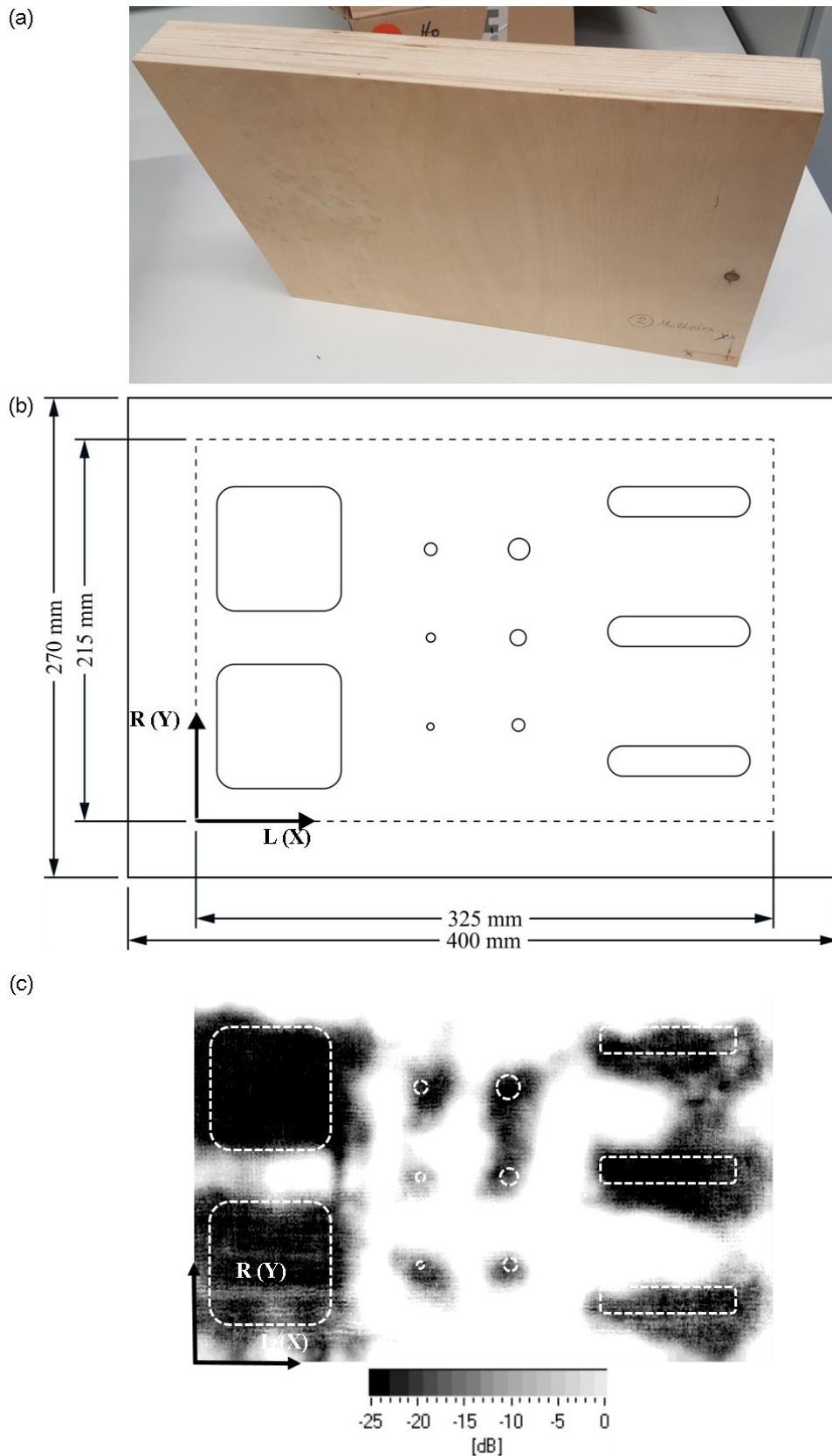


Figure 3.20: Sketch of the birch panel Plywood 1 with artificial defects and a coordinate system indicating the inspected area. The defects should imitate a delamination such as incorrect adhesions and knotholes. For all these defects the glue is absent. Additionally, six circles are drilled in various sizes (3 – 9 mm) and the three rectangles in various depths (0.5 – 1.5 mm) (a). C-Scan i.e. signal heights in dB with a frequency of 128 kHz (b).

Fig. 3.20 shows the results of a measurement to detect delamination in wood-based materials. Fig. 3.20b shows the attenuation of the ultrasonic measurement as a C-Scan. All defects can be detected with no differences between delamination on the left and milling on the right. The missing adhesive leads to a higher attenuation of the signal.

It is possible to use ACU for the characterization of wood degradation by fungi as well, which is shown in Fig. 3.21. Sound wood with a high density attenuates the ultrasound much less because of a decreased scatter. In Fig. 3.21b the infected parts can be distinguished from sound wood easily despite a component thickness of 120 mm.

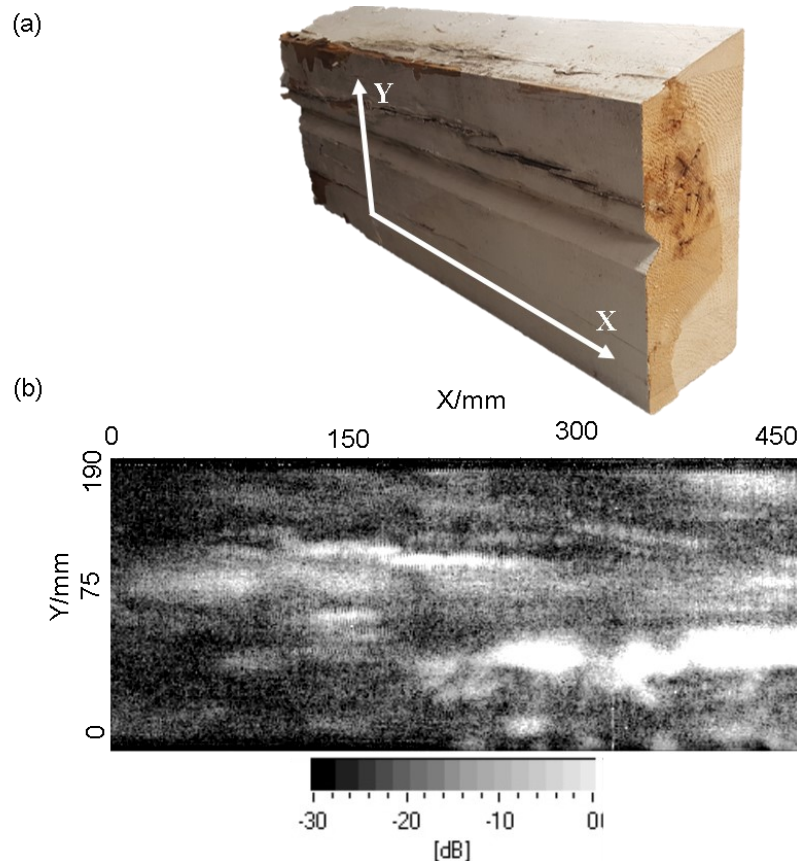


Figure 3.21: Varnished glued laminated timber Spruce 2 with indicated area of inspection. The sample includes brown rot on the left site caused by moisture damage in a building which spreads out over the timber. The right site is lightly infected (a). The inspection result of the specimen with a frequency of 90 kHz displayed as a C-Scan, i.e. signal height in dB. Black color on the left side indicates rotten wood, light gray on the right-side sound wood (b).

Previously submitted measurements on glued laminated oak have shown that cellular PP transducers allow the detection of glued joints, knots, and insect attack. Due to the improved SNR the resolution is up to three times better than that from commercially available transducers [Gaal et al. 2019].

The material and their thickness and density has a huge impact on the suitability for through transmission [Hilbers et al. 2012b]. Comparative measurements on Glulam, LVL, MDF, OSB, and chipboard without artificial defects have shown that materials with low densities, big particle size and large thicknesses complicate the evaluation because of high attenuation and

refraction. Particles and pores act as scattering centers and lead to attenuation of the ultrasonic signal. Homogeneous materials with small particle size, for example MDF, are better for transmission than materials with high branchiness or big particles, such as LVL out of pine and OSB. Particles with a diameter being considerably below the wavelength of the transducer act as scattering centers and cause attenuation. It becomes obvious that both density and particle size influence the ultrasonic transmission; firstly, in comparatively homogeneous panels, the ultrasonic transmission decreases with increasing density, and secondly, the transmission at low densities decreases with increasing particle size [Hilbers et al. 2012b].

Nevertheless, the receiving signals with cellular PP are in all aspects stronger than with piezoceramic transducers. Some materials such as glued laminated timber and solid wood without defects are suitable for through transmission up to the maximum scanning width of the device of 3000 mm. If the received signal of a through transmission is not powerful enough, lower frequencies at the expense of resolution can help. Own measurements on the above-mentioned materials have shown that frequencies from 90 kHz to 120 kHz yield results which have an optimal relation between resolution and penetration depth. High frequencies over 130 kHz are only feasible for thin materials and a high-resolution concern.

A transverse orientation of the transducers to the sampling surface improves the measuring results by impeding multiple echoes [Sanabria et al. 2013]. The problem of a slanted through transmission is a distortion of the defect's indications, which impairs the resolution.

#### 3.3.6 Conclusion

Since air-coupled ultrasound allows for regular and reliable inspection, the possibility to detect defects, damage, and decay in timber structures may help to improve the acceptance of timber as a building material on a larger scale. WBM with high reliability demands such as bridges and housing require regular monitoring and assessment. ACU can help to fulfill this task.

Cellular PP transducers are a promising new type of transducers for ACU testing since even thick materials with low density can be scanned. These transducers have many advantages – they are powerful, non-hazardous, and their production is simple. The receiving signal is up to three times higher than from piezoceramic transducers. It is possible to detect delamination, rot and cavities reliably so that suitable remediation can be initiated. PP transducers can produce usable inspection results where piezocomposite transducers fail due to a lower SNR.

Future work is planned to implement an exploration of WBM in reflection mode, for which access to only one face is necessary. Another aim is to improve the signal evaluation, for instance, data fusion of TOF, amplitude, and phase. The goals are to detect even smaller defects, sections, and arbitrary defect geometries, such as, micro delamination, cracks, and decay.

#### Acknowledgment

The research work was subsidized by the Cusanuswerk, Episcopal Study Sponsorship.

### 3.4 Imaging wood defects using air coupled ferroelectret ultrasonic transducers in reflection mode

Published in the journal Construction and Building Materials

Volume 241, 30.04.2020, Pages 1-9

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118032>

Konrad J. Vössing, Mate Gaal and Ernst Niederleithinger

## Imaging wood defects using air coupled ferroelectret ultrasonic transducers in reflection mode

### Keywords

Air-coupled ultrasound, Cellular polypropylene, Defect detection, Nondestructive Testing, Reflection mode, Timber

### Abstract

Air-coupled ultrasound (ACU) is used to detect defects in wood panels without physically contacting the sample and with a quick scanning rate. Transducers made of cellular polypropylene (PP) with a high signal-to-noise ratio are quite suitable for ACU testing of wood. The extremely low modulus of elasticity and low density of PP transducers results in a small difference in acoustic impedance for the transmission of ultrasonic waves between the transducer and air, allowing new areas of application to become possible. To demonstrate the suitability of the reflection technique, measurements are shown on the three samples Multiplex, LVL, and MDF and compared with transmission measurements. Due to this acoustic barrier and the use of cellular PP transducers, an exact detection of delamination and cavities is possible in wood panels up to 40 mm thick. If only one side of an object is accessible and the depth of the defect is of interest, the reflection technique is preferred at the expense of a reduced measuring accuracy and penetration depth.

### 3.4.1 Introduction

Since the use of timber and engineered wood products (EWP) in both existing buildings and in new construction projects is increasing due to a growing emphasis on sustainable development, the need to examine them is increasing as well. Therefore, a reliable quality assessment of EWP is necessary to detect any faulty products, reduce safety hazards, and maximize the life span of wooden components.

Besides conventional timber, EWP such as multiplex, laminated veneer lumber (LVL), and medium-density fiberboard (MDF) are becoming more common because they can open up new fields of application. This engineered timber has, for example, increased stability and safety due to homogenization of the characteristic features of wood, facilitating testing with ultrasound. The features of wood such as knots, grain orientation, and annual rings lead to anisotropy and heterogeneity and complicate the measurement because they interfere with the propagation of the ultrasonic waves [Bucur 2005; Hughes 2015].

Defects can occur during the production process and use phase of the EWP. In the production process for EWP, blisters, blows, and delamination are of great concern [Bucur 2005]. These defects can be caused during moisture content change, fabrication, pressing, and curing. The standard approach for testing is:

1. Detection,
2. Localization,

3. Characterization,
4. Decision to act, if the flaw is important enough [Bucur 2005].

Many nondestructive testing (NDT) techniques such as radiography, sonic stress wave, electrical resistivity, radar, and ultrasound have been examined to solve these problems [Riggio et al. 2015; White and Ross 2014; Vössing and Niederleithinger 2018; Ross and Pellerin 2002].

Some of these techniques such as electrical resistivity or ultrasound need contact or a coupling agent between transducer and sample which makes the process extremely time-consuming [Gräfe 2008; Sanabria et al. 2011b]. In the case of wood, coupling is problematic since agents such as gel, liquid, or nails may contaminate or perforate the sample. Therefore, air coupled ultrasound is preferred for industrial wood inspection [Dill-Langer et al. 2005]. Other techniques, for example, radiography, are only possible with high precautionary measures to safeguard the staff.

Transducers based on air-coupled ultrasound (ACU) overcome these drawbacks by avoiding direct contact with the sample. This non-hazardous measurement can scan large areas, is fully automated, and provides an image of the defects within a short time. The acoustic tomography is performed with both time of flight (TOF) and attenuation of the ultrasonic signal as contrast-producing parameters [Bucur 2011]. Especially in the continuous manufacturing process of EWP, ACU makes an important contribution to automated production [Hilbers et al. 2012a].

In most cases, less than 0.5% of the energy of an ultrasonic wave in air is transmitted into solids [Sanabria et al. 2011a]. At every boundary (transmitter/air, air/solid, solid/air, air/receiver) the majority of the energy is reflected. If a solid is a structure with a thickness significantly smaller than one quarter of the wavelength of a longitudinal wave in that solid, or close to a multiple of the half of the wavelength, the transmission through that structure will be considerably higher. Therefore, the applicability of ACU transducers has been thus far limited to thin samples (<30 mm) [Blomme et al. 2010]. Recent developments in transducer technologies allow transmission of materials up to 200 mm [Vössing et al. 2018; Gaal et al. 2019]. Thus, new areas of application are open in quality assurance of EWP.

Ultrasonic techniques can be divided into two groups:

- For transmission, the sample is placed between the transmitter and the receiver.
- For the reflection (or echo) mode, transmitter and receiver are located on one side of the specimen so that the reflected pulse can be received.

Various reviews have been published on this subject [Fang et al. 2017; Chimenti 2014; Buckley 2000]. Specific ACU techniques for wood were described by Sanabria [Sanabria 2012], Solodov, et al. [Solodov et al. 2004], Hasenstab [Hasenstab 2006], Marhenke, et al. [Marhenke et al. 2018], and Vössing, et al. [Vössing et al. 2018]. Measurements in reflection were performed on concrete by Gräfe [Gräfe 2008] and on wood by Dill-Langer, et al. [Dill-Langer et al. 2005].

The experiments for the imaging of defects in this paper were performed on three test samples with air-coupled ultrasonic transducers based on charged cellular polypropylene (PP) [Paajanen et al. 2000; Wegener et al. 2004; Sessler and Hillenbrand 1999; Döring et al. 2012]. Charged cellular polymer is called ferroelectret or sometimes piezoelectret because it has ferroelectric, and therefore piezoelectric properties. Transducers out of cellular PP are a new type of transducer with outstanding features. They are very powerful, non-hazardous, and long-lasting. The signal which is picked up by the receiver is up to three times stronger than those from piezoceramic transducers [Vössing et al. 2018]. Up to now, most of the ultrasonic transducers were made from piezoceramic materials [Kunkle et al. 2006] and had been used for ACU measurements [Hasenstab 2006]. The disadvantage of piezoceramic transducers is that they are too weak to be used in reflection mode. In transmission they are often only applicable for thin EWP. The reflection setup presented in this article has the advantage of one-sided access, a high reproducibility, and an extremely high repetition frequency of the pulse.

The objective for this study is the detection of the main defects in EWP panels with ACU. New cellular PP transducers should allow high precision defect detection in reflection mode. The measurements will be compared with measurements in transmission to understand the advantages of the reflection technique. In addition, the advantages of the new acoustic barrier are demonstrated by comparing it to a classic slide seal.

### 3.4.2 Materials and methods

#### Test sample preparation

Multiplex, LVL, and MDF were used as test specimens to examine the measurement technology in reflection mode (Table 3.3). The samples were frequently used materials which must fulfill high quality requirements. These products were composed of several layers of wood or wood fibers stuck together. The wood equilibrium moisture content was 9 % at 50 % relative air humidity, the temperature was 24°C. The samples selected had as few natural defects as possible so that they would not influence the result. Artificial defects such as incorrect adhesives, milling, and drillings were inserted into reference samples to show the potential of ACU for NDT. Incorrect adhesives should simulate a delamination. To produce this artificial delamination, the glue between two veneers was left in the size of the defect. The MDF specimen was fabricated with four 10 mm panels glued together. Drillings and millings simulated dead knots and consisted of missing layers. Moreover, measurements on defect-free sections were performed to determine the suitability for transmission and reflection measurements in general.

Table 3.3: Parameters of the three test samples.

<b>Multiplex, birch (betula)</b> (Fig. 3.23-5.28)	<b>LVL, beech (fagus)</b> (Fig. 3.29)	<b>MDF</b> (Fig. 3.30-3.32)
Density: 670 kg/m <sup>3</sup>	Density: 700 kg/m <sup>3</sup>	Density: 740 kg/m <sup>3</sup>
1000 × 500 × 24 mm <sup>3</sup>	380 × 250 × 40 mm <sup>3</sup>	600 × 450 × 40 mm <sup>3</sup>
18 crosswise bonded veneers glued with PVA D3	12 layers of veneer glued with a PU-glue	Mixed fibers
4 defects: missing adhesive on the bottom (100 × 100 mm <sup>2</sup> ), 2 millings in the middle (10 mm diameter, 5 mm depth, and 50 × 50 × 12 mm <sup>3</sup> ), and 1 milling on the top (100 × 100 × 1 mm <sup>3</sup> )	4 defects: 4 lateral drillings in the middle of the panel (10 mm diameter, 160 mm depth)	9 defects at three levels (10, 20, 30 mm): 3 × 3 delamination (100 × 50 mm <sup>2</sup> ), spaced out evenly

### Ultrasonic equipment

The charged PP films (produced by EMFIT Ltd.) used as transducer material are similar to thin foam and have a thickness of approximately 70  $\mu\text{m}$ , density of about 330 kg/m<sup>3</sup>, and an extremely low elastic modulus of about 1 MPa at their resonance frequency [Gaal et al. 2016b], which is around 250 kHz, creating a more favorable acoustic impedance for the transmission of ultrasonic waves [Döring et al. 2012; Gaal et al. 2016a]. The impedance of  $0.03 \times 10^6$  Ns/m<sup>3</sup> is significantly lower than the impedance of piezoelectric materials commonly used as ultrasonic transducers with approximately  $30 \times 10^6$  Ns/m<sup>3</sup>. The material provides good matching to air so that it requires no matching layers between transducer and air like conventional air-coupled transducers [Zhang et al. 2004].



Figure 3.22: Cellular PP receiver for air coupled ultrasonic measurements. The receiver consists of the cellular PP transducer (right) and a preamplifier (left).

The transducers made of cellular PP can differ in terms of frequency, diameter, and focusing. Here, we have used frequencies from 90 kHz to 250 kHz, diameters from 19 mm to 27 mm, and focusing with a radius of 0 mm to 50 mm [Gaal et al. 2016a]. Lower frequencies can be



realized by gluing several cellular PP films together (two films result in 130 kHz, three films in 90 kHz). The novel transmitters were excited with 1.8 kV pulses so that the electrostatic compression of this cellular PP has a significant contribution to its vibration [Döring et al. 2012; Döring et al. 2010]. For all measurements, the scanning devices FlatScan1000 and the USPC 4000 AirTech (from company Hillger NDT GmbH) are used (Fig. 3.22).

### Experimental setup

A previously published study on measurements in transmission mode has shown that cellular PP transducers allow the detection of delamination, glued joints, knots, and wood degradation by fungi and insect attack [Vössing et al. 2018]. The disadvantage of this configuration is that access to two sides of a sample is not always available (Fig. 3.23a). Therefore, we have used an experimental setup with the transmitter and receiver at the same side of the sample (Fig. 3.23b).

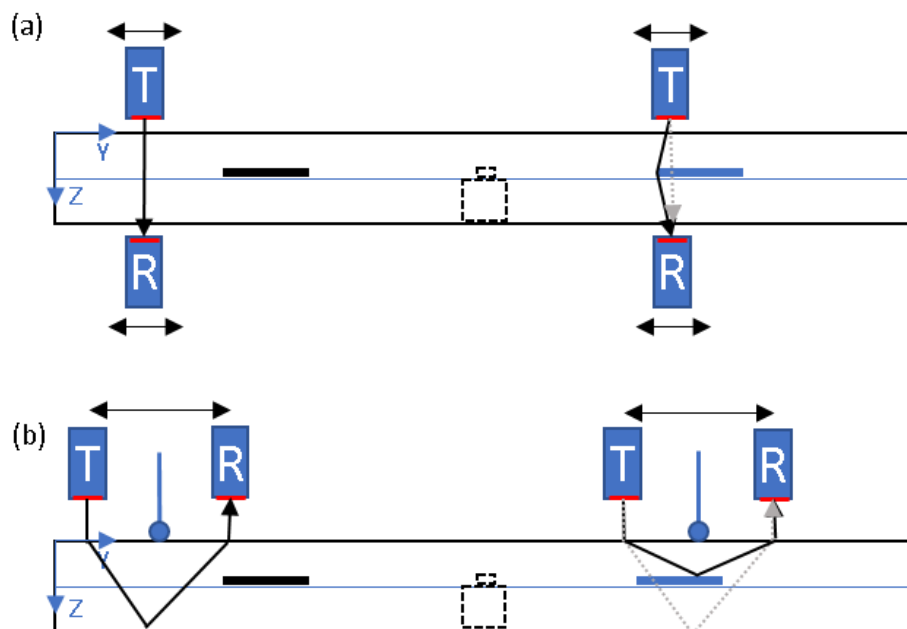


Figure 3.23: Test configuration of the multiplex specimen for backwall and defect detection by means of transmission (a) and reflection (b) measurements.

During the scan, the transmitter and the receiver were moved together over the surface of the sample in a meandering pattern, while receiving the TOF and signal amplitude of individual pulses and putting them together as a composite image (so called D-Scan and C-Scan respectively) (Fig. 3.24a). Both data were recorded by a quasi-peak-detector. The transmitter was excited with four unipolar square pulses. By measuring the signal's TOF it is possible to calculate the depth of a defect. The ability to measure depth is another advantage of this configuration compared to transmission.

The acoustic signal propagates into the sample. On its path, it crosses several boundaries (e. g. surface, backwall, layer, or defect) with different acoustic impedances, where the wave is partly reflected. Back at the surface, the wave is partially reflected again into the sample, but

a part is transmitted into the air and picked up by the receiver. Both transducers were separated by a shield in form of a foam roller to avoid direct sound propagation via air to the receiver (Fig. 3.24b). The roller has, in contrast to the slide seal used previously, the advantage of reduced abrasion and noise generation. The shield is pressed continuously on the surface to compensate for small irregularities of the surface. The benefits of this setup are a higher rate of speed and less noise interference. The incidence angles of the transducers were  $1^\circ$  and the distance to the sample around 50 mm. Previous internal testing and related studies of [Gräfe 2008] have shown that the orientation of the transducers should be as perpendicular to the surface as possible. Moreover, the gap between the transmitter and receiver should be as small as possible. The sample is scanned radial/ tangential to the surface, and the grid of the scan is 1.5 mm but can vary depending on the resolution required.

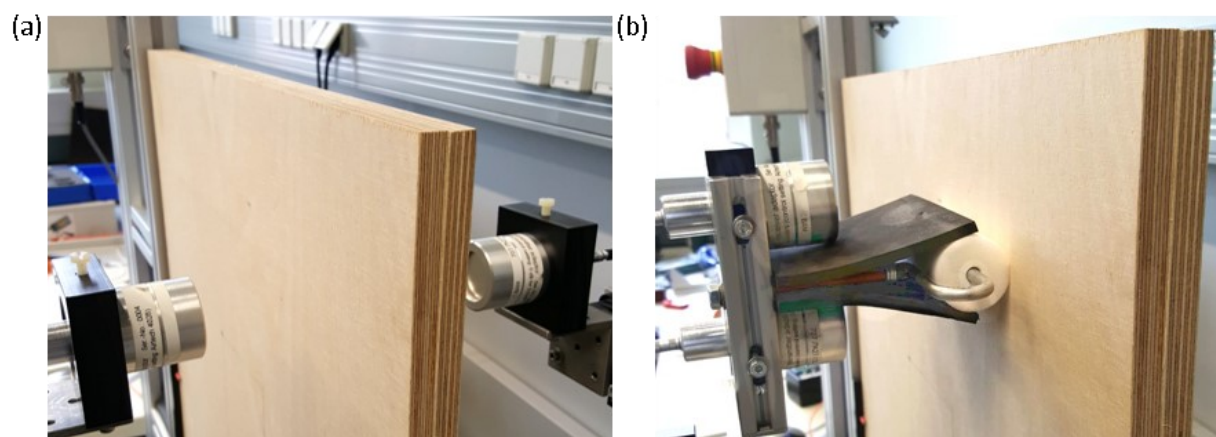


Figure 3.24: Experimental setup in transmission (a) and reflection with foam roller (b).

Previous measurements have shown that transducers with frequencies of around 100 kHz achieve the best results [Vössing et al. 2018]. This frequency is a trade-off between resolution and penetration depth. Therefore, the cellular PP transducers with a center frequency of 90 kHz, a focal distance of 51 mm and an aperture diameter of 27 mm were used for all measurements.

### 3.4.3 Results and discussion

In reflection, the millings (center of the defect at  $x=160$ ,  $y=670$  and  $x=210$ ,  $y=450$ ) of the multiplex panel can be seen in the C-Scan which is performed with the attenuation of the ultrasonic signal (Fig. 3.25).

The anisotropy of wood causes numerous interferences in the ultrasonic signal. In addition to the artificial defects, unknown defects (red color) have a huge influence on the scan as well. Especially the layer structure of the multiplex veneers, causes numerous reflections and disturb the expected reflection at the delamination.

The delamination ( $x=160$ ,  $y=170$ ) is not completely detectable. Just a small part of the energy is transmitted into the sample. The waves reflected from the inside of the material are very

weak and get lost in the signal noise. Sometimes it is too hard to separate the echoes at different boundaries, for example the delamination, and to extract the expected information.

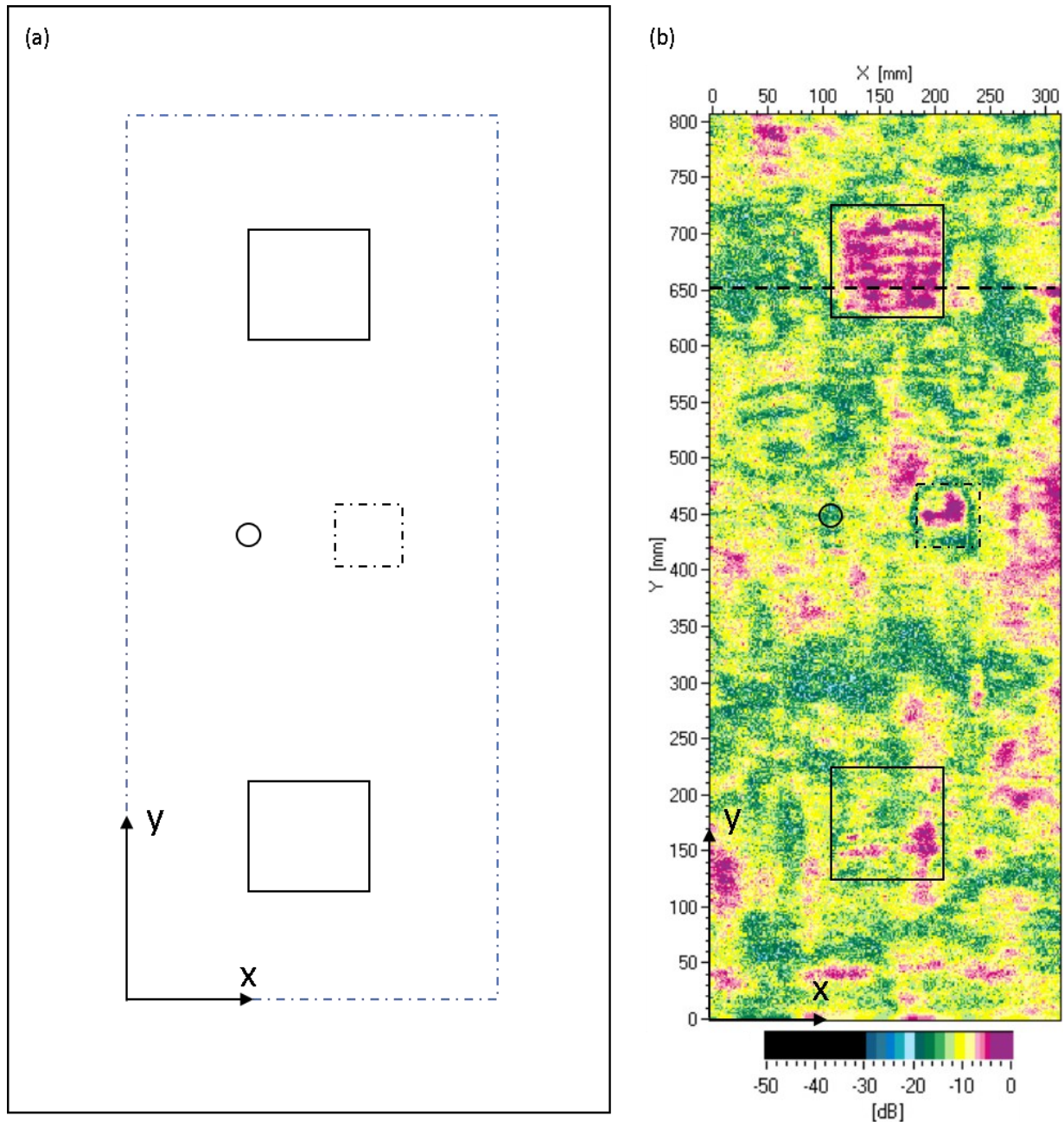


Figure 3.25: Sketch of the multiplex specimen with artificial defects and a coordinate system indicating the inspected area. The defects should imitate incorrect adhesions and dead knotholes (a). Amplitude (C-Scan) in the range of  $400 \mu\text{s} - 500 \mu\text{s}$  in reflection with a frequency of 90kHz (b).

For comparison, Figure 3.26a shows the amplitude of the air-coupled ultrasonic inspection on the multiplex specimen in transmission. With this experimental setup, all defects were localized. The image of the milling ( $x=150, y=650$ ) has sharp boundaries and reflects the exact position of the defect. The two defects ( $x=100, y=425$  and  $x=200, y=425$ ) can be detected as well. The delamination ( $x=150, y=150$ ) can be localized, but due to the blurred glue the boundary line is not exact.

In addition, Figure 3.26b shows the TOF. The milling ( $x=200, y=425$ ) has a better visibility due to the 12 mm offset of the back wall.

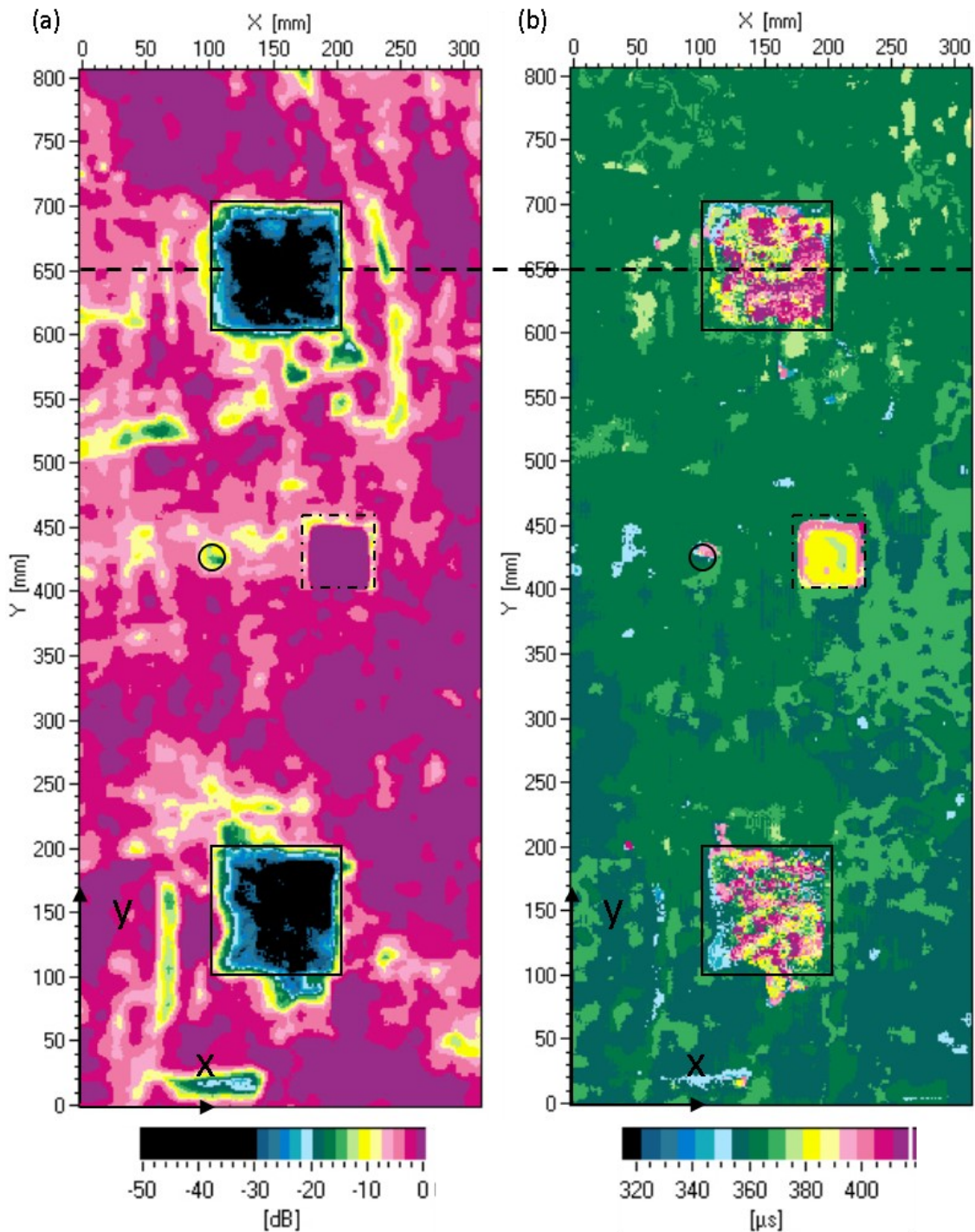


Figure 3.26: Amplitude (a) and TOF (b) of the multiplex specimen in through transmission.

The question arises, why the delamination ( $x=150, y=150$ ) was not completely detected in reflection mode. In reflection, the anisotropy of wood has a bigger influence on the ultrasonic signal of deeply located flaws due to an extended sound path inside the specimen. The sound path in reflection is longer because the signal of the backwall passes the sample twice. Moreover, the sound passes through the sample transversely and not perpendicularly like in

transmission (Fig. 3.27). The result is a distorted scan caused by different sound velocities in all three anatomic directions. In a 40 mm thick panel the sound path inside the material lengthens by 70 mm compared to the transmission measurement (110 mm in reflection versus 40 mm in transmission).

The surface waves pose another challenge as they overlap the defect and backwall echoes of the specimen so that the defects can only be localized approximately and the boundaries to sound wood become indistinct. Due to the distance between transmitter and receiver of approximately 80 mm, a dead zone of a few millimeters emerges in the sample where no results can be obtained. The dead zone emerges because the main direction of the wave propagation is vertical and not lateral to the sample. The lateral energy is too weak to cause a reflection.

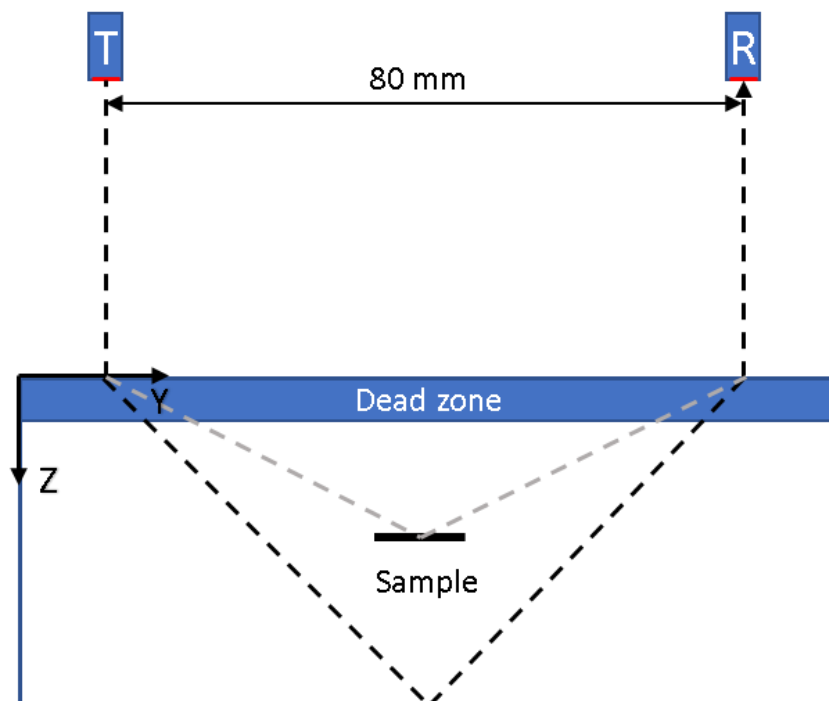


Figure 3.27: Sketch of the measurement setup in reflection.

Another issue is the multiple layers of veneer in a multiplex panel glued together. Each layer causes a reflection at the transition from glue to wood. These little reflections weaken the pulse and interfere with the signal of interest.

These difficulties can be seen in Figure 3.28 at a measuring line ( $y = 650$ ). The distinctions between sound wood and defect are about 25 dB higher in transmission than in reflection (32 dB in transmission versus 7 dB in reflection). The difference of the signal strength is called contrast. In transmission mode, the signal gets weaker at a delamination because of an additional boundary layer where the signal gets partly reflected. This is caused by an air gap due to the defect. In reflection mode, the TOF from the transmitter to receiver is shortened due to the defect. Relative to the backwall echo, the amplitude gets stronger.

In Figure 3.29 the differences of a foam roller (a) and a slide seal (b) in reflection are apparent. A detail of the LVL specimen is enlarged in order to focus on the interesting parts. The image shows the TOF of the air-coupled ultrasonic inspection on the specimen. The dashed lines show the location and size of the four drillings.

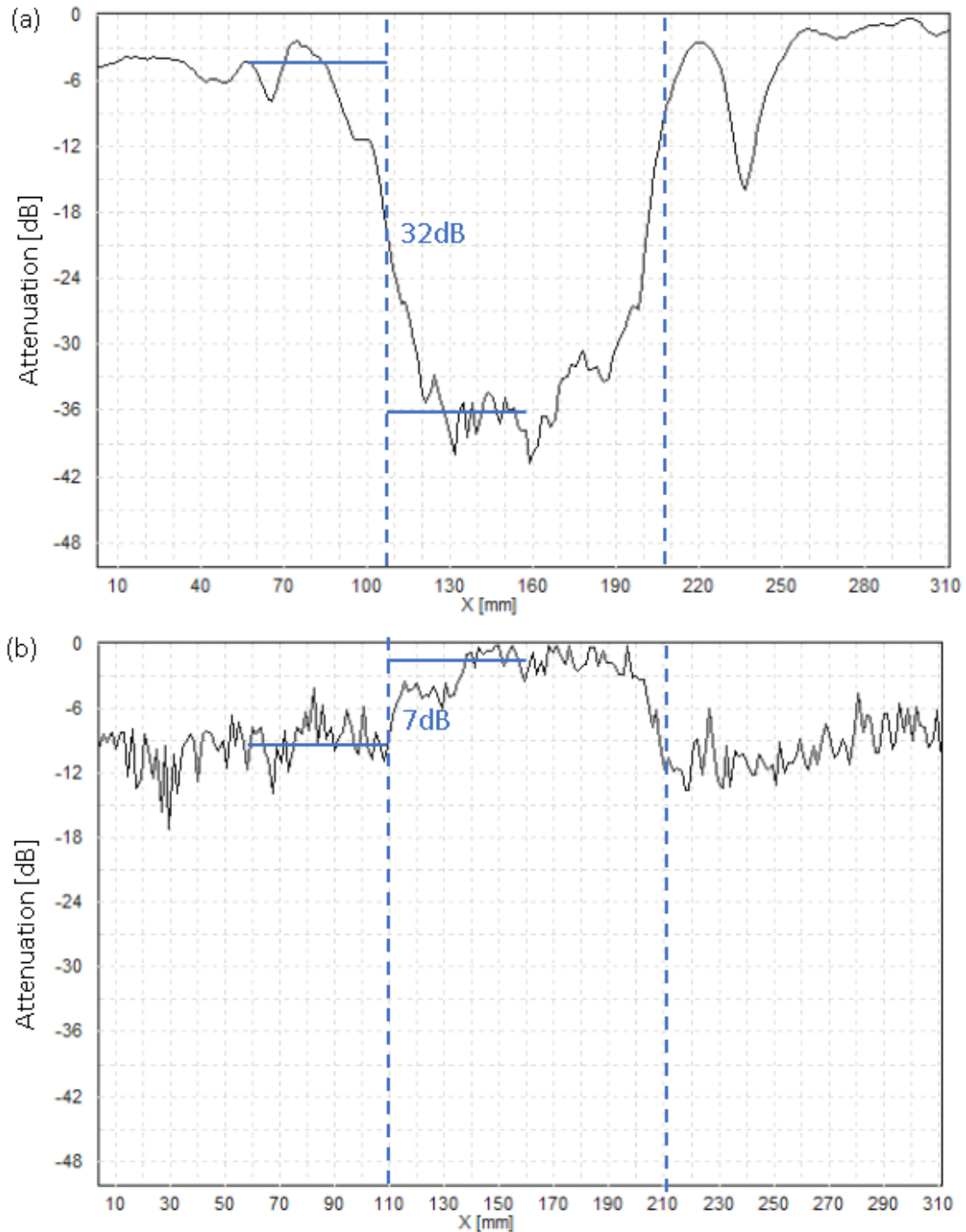


Figure 3.28: Signal contrast of the multiplex specimen in transmission (a) and reflection (b) along the dotted line  $y=650$ . The blue lines are indicating the width of the milling.

Especially in Figure 3.29a, it is possible to see the drillings which were inserted into the left side of the specimen. Two natural defects (dead knots) symbolized by blue dash lines are

visible as well ( $x=100, y=110$  and  $x=70, y=20$ ). A slide seal leads to an inaccurate D-Scan due to a higher noise generation and a poor acoustic shielding (Fig. 3.29b). The resulting surface waves interfere with the reflection of the drilling. If the signal meets one of the four drillings, it gets reflected earlier. Therefore, it is possible to see a reduced TOF in the D-Scan of around  $20 \mu\text{s}$ .

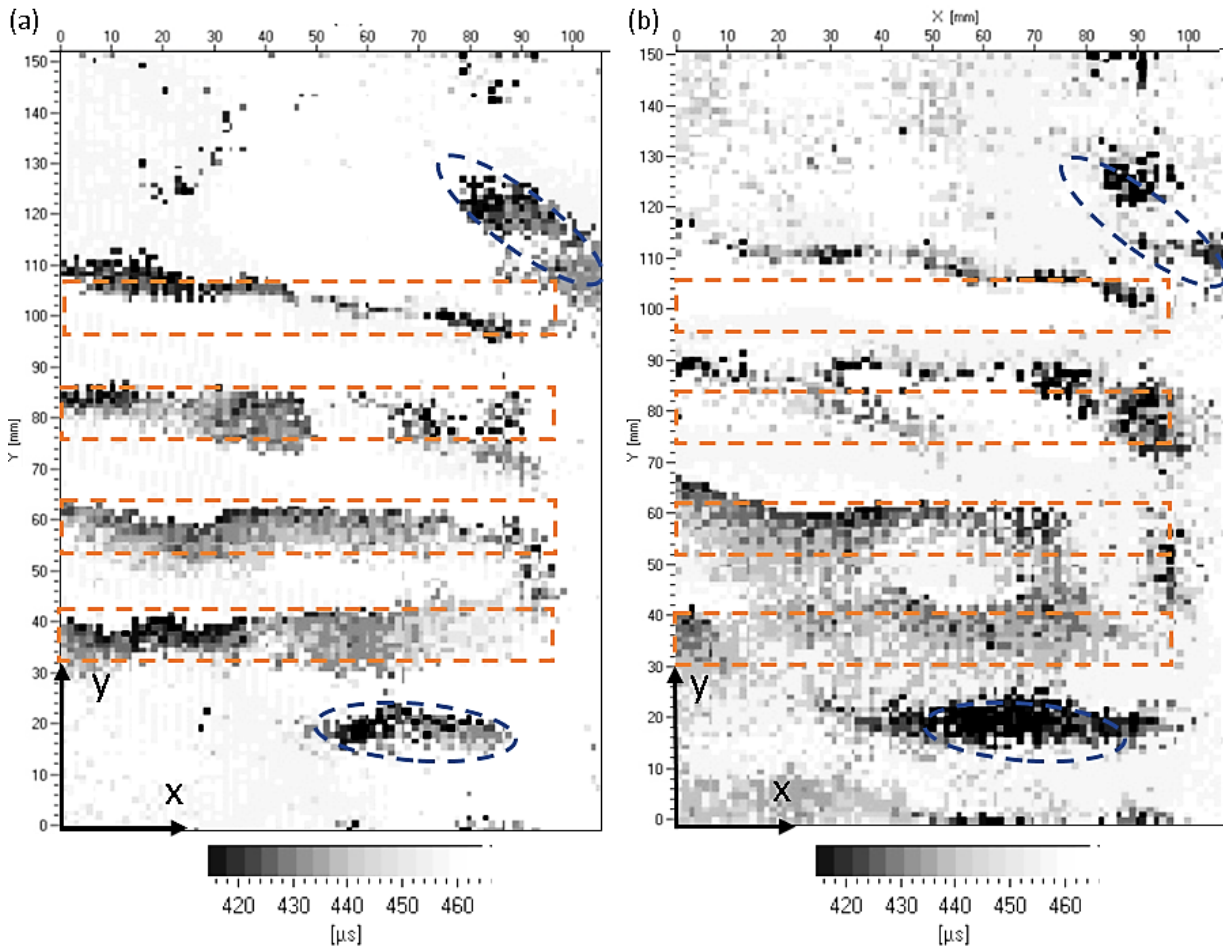


Figure 3.29: TOF (D-Scan) of the LVL specimen. Transducers are separated by a foam roller (a) and a slide seal (b).

Figure 3.30 shows the result of a measurement on a MDF specimen to detect delamination in wood-based materials. There are nine delaminations at three different depths to verify whether detection at various levels is possible. If the sound velocity or the thickness of the material is known, one can draw inferences about the exact position of a defect.

Figure 3.30b shows the TOF of the ultrasonic measurement as a D-Scan. All defects can be detected. The missing adhesive leads to a changing TOF. The delamination is clearly visible because the MDF material is homogeneous without disturbing layer structure. Nevertheless, the imaging result does not follow the delamination in the specimen precisely, which is a side effect of the reflection technique. The defects appear bigger than they are, especially in the Y-direction as a result of the transducer orientation.

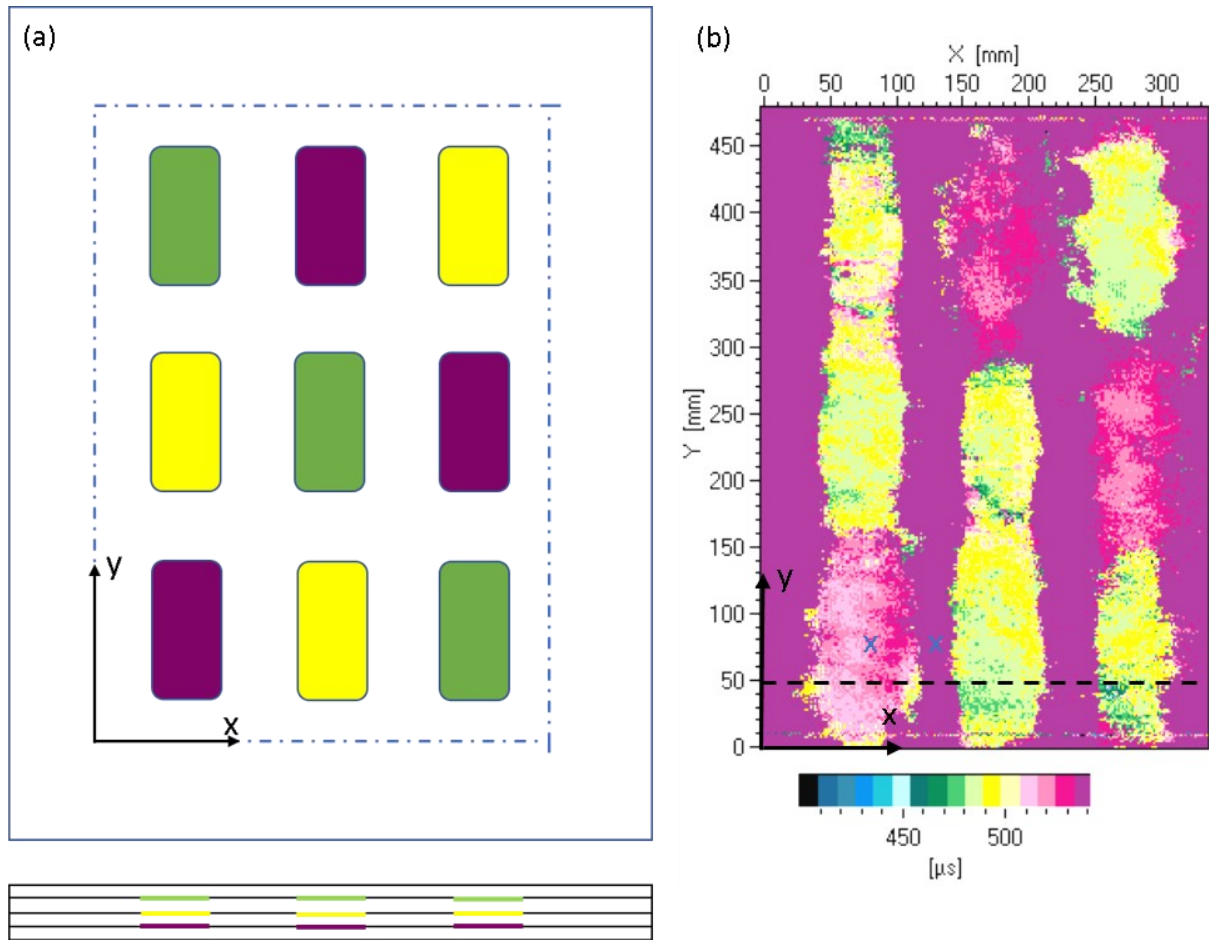


Figure 3.30: Sketch of the MDF panel with artificial defects and a coordinate system indicating the inspected area. The defects should imitate a delamination with absent glue (a). TOF with a frequency of 90 kHz (b).

Figure 3.31 shows the typical receiving waveforms for the MDF specimen on a defect-free section and a delamination on the third level. In Figure 3.31b the receiving waveforms are changing in the presence of a delamination, and their amplitude increased. On a defect-free section the amplitude is lower due to the extended TOF in the material and the resulting sound attenuation.

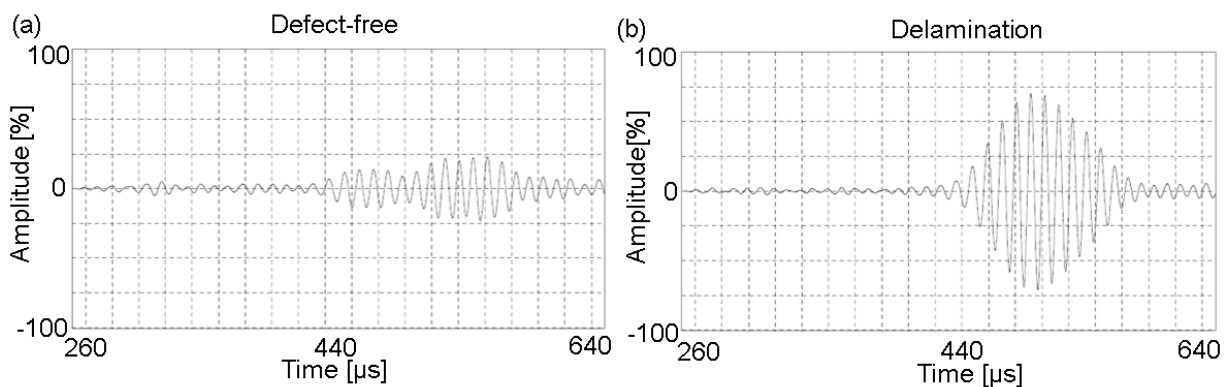


Figure 3.31: Receiving waveforms for MDF specimen on a defect-free section ( $x=125, y=75$ ) and a delamination ( $x=75, y=75$ ). The sections are marked with a blue cross.



Figure 3.32 shows the TOF at the three delaminations and the backwall. The sound velocity inside the MDF can be calculated by means of distance and TOF. Because of the unknown sound path inside the material, the velocity is just an approximate value. The reflection of the highest delamination is very indefinite due to their position near the surface.

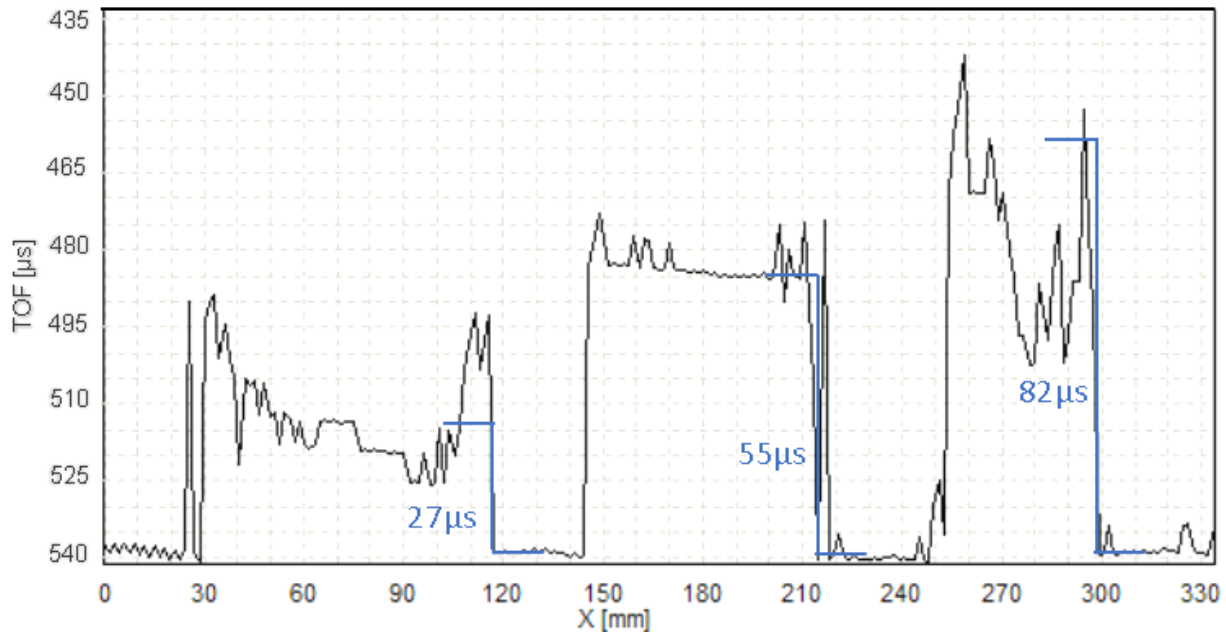


Figure 3.32: TOF of the MDF specimen at the three levels ( $y = 50$  mm). The blue lines are indicating the time from the backwall to the delamination.

Comparing the ACU results with former publications [Gräfe 2008; Hasenstab 2006], the detection of wood defects in reflection mode is possible for the first time with such high resolution and low costs. Due to ACU transducers, measuring rates of 75 points/s are possible. This rate is 200 times faster than reflection measurements with conventional point-contact transducers [Hasenstab 2006]. For the latter, the transducers must be pressed to the surface by a pneumatic device at each scanning position. Compared to through transmission [Vössing et al. 2018], the thickness of the samples may just be a fifth of the original width (200 mm vs. 40 mm) but with an additional depth indication.

#### 3.4.4 Conclusion

Measurements in reflection are much more challenging than tests in transmission. The signal is very weak due to scatter and interfering waves on a sound path in the sample, which is longer than in transmission. Nevertheless, millings, cavities and drillings can be detected and localized. Moreover, the depth of the defects can be determined due to the changes of the TOF. This information helps the tester to narrow down the location of the defect and perhaps to understand the cause of the emergence. The novel acoustic barrier in form of a foam roller helps to gain better results because surface waves are suppressed. So far, measurements in reflection mode were limited to samples not thicker than 40 mm. For future research, thicker samples should be examined.

Since air-coupled ultrasound allows for regular and reliable inspection, the possibility to detect defects in timber and EWP may help to improve the quality of the products and to reduce the costs of production and maintenance. EWP with high reliability demands require regular monitoring and assessment to preserve their good qualities. Air-coupled ultrasound can help to fulfill this task.

### Acknowledgment

The research work was subsidized by the Cusanuswerk, Episcopal Study Sponsorship.

## 4. Weiterführende Untersuchungen

Neben dem luftgekoppelten Ultraschall, der den Schwerpunkt der Arbeit bildet, werden im Folgenden noch andere ZfP-Verfahren und Kombinationen verschiedener Methoden beschrieben. Das Radarverfahren und die Erfassung des Bohrwiderstands werden dabei mit der Ultraschalltechnik hinsichtlich Genauigkeit, Eindringtiefe und Messgeschwindigkeit verglichen und bewertet. Zusätzlich soll mit einer Machbarkeitsanalyse die Entwicklung eines mobilen Luftultraschall-Messgerätes geprüft werden, damit das untersuchte System in die Praxisanwendung *in situ* überführt werden kann.

Durch die Nutzung der unterschiedlichen physikalischen Funktionsweise von Radar und Ultraschall können verschiedene Informationen aus den Probekörpern gewonnen werden. Nicht die akustische Impedanz zweier Materialien, sondern der Permittivitätskontrast ist beim Radar von entscheidender Bedeutung.

Ein ultraschallbasiertes Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass auch massive Holzstrukturen durchdrungen werden können. Es ermöglicht die Detektion von Fäule, Rissen, Delaminationen und Spaltern, die in der Holzverarbeitenden Industrie hohe Kosten verursachen. Als Spalter werden Lufteinschlüsse bezeichnet, die unter hohen Temperaturen zu einem Aufplatzen der Holzwerkstoffplatte führen. Die Bildauflösung ist jedoch geringer als beim hochfrequenten Radarverfahren und kann deshalb nicht alle Informationen abbilden.

Das hochfrequente Radarverfahren eignet sich dagegen wegen seiner höheren räumlichen Auflösung bei gleichzeitiger Feuchte- und Metallsensitivität für das Erkennen von Minderdicken, Feuchteänderungen und metallischen Einschlüssen. Denn Metallteile können ungewollt während des Produktionsprozesses in die Werkstoffe gelangen oder sich z.B. in Form von Munitionssplintern bereits im Baumstamm befinden. Solche Fremdkörper sind ein Problem, da durch sie die Sägen beschädigt werden können und lange Stillstandszeiten die Folgen sind. Mit niederfrequentem Radar (ca. 2 GHz) können in massiven Objekten Fehlstellen aus verschiedenen Materialien unterschieden und Metalleinschlüsse detektiert werden.

## 4.1 Machbarkeit eines mobilen Messgeräts für Prüfungen in Reflektion

Schon seit einigen Jahren werden mobile Handmessgeräte für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen entwickelt. Diese Messgeräte arbeiten mit Ultraschall, der über Punktkontakt-Prüfköpfen in das Bauteil eingeleitet wird. Beispiele kommerziell verfügbarer Prüfgeräte sind das A1220 Monolith (Abbildung 4.1) und das Linear-Array MIRA der Firma Acsys. Diese Geräte, die ursprünglich für die Prüfung von Beton entwickelt wurden, können auch an Holzbauteilen eingesetzt werden [Hasenstab 2006; Krause et al. 2014]. Der Nachteil dieser Geräte ist die lange Messdauer, da für jede Messung der Prüfkopf verschoben werden muss. Eine Neuentwicklung der Firma ELOP macht das ständige Absetzen unnötig, indem die Prüfköpfe in den Rädern integriert sind, welche über das Bauteil gerollt werden [Chapagain et al. 2018]. Diese Technik ist der mit Punktkontakt-Prüfköpfen ähnlich – eingeschlossen der genannten Nachteile. Auch hier ist der direkte Kontakt zum Probekörper notwendig, der in der Praxis aber nicht immer möglich ist. Zudem war das Gerät zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht für eine Evaluierung verfügbar.



Abbildung 4.1: Ultraschallmessgerät A1220 Monolith.

Ausgehend von den bereits zur Verfügung stehenden stationären Messgeräten wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein mobiles Gerät entworfen, das eine permanente und kontaktlose Messung ermöglicht. Das Gerät soll dazu verwendet werden, den Zustand von Holzbauteilen einzuschätzen, indem es über die Probekörper geführt wird. Insbesondere bei Holzträgern, beispielsweise aus Brettschichtholz, soll das Messverfahren Delamination, Risse und Fäule bis in eine Tiefe von ca. 30 cm detektieren können.

In dem Prototyp, der in Abbildung 4.2 dargestellt ist, werden die bekannten zellulären PP-Wandler mit einer Frequenz von 90 kHz eingesetzt. Die Wandler werden, in ihrem Einschallwinkel schwenkbar, an einer Konstruktion aus Aluminiumprofilen, befestigt. Sender und Empfänger sind durch eine Schallabschirmung aus Schaumstoff voneinander getrennt. Die gesamte Konstruktion ruht auf vier kugelgelagerten Rollen. Über den Wandlern befindet

sich ein Handgriff, der ein sicheres Führen des Scanners über das Bauteil ermöglicht. Das Ansteuern der Sender und die Auswertung der Signale erfolgt im Prototyp über die gleiche Software, die auch bei den fest installierten Messgeräten verwendet wird [Hillger, 2004].

Zukünftig wäre die Unterbringung sowohl der Signalerzeugung als auch der Datenerfassung im Handscanner zu erwägen, damit ohne weitere Kabel oder externe Module ein mobiler Einsatz des Messgeräts und eine Übertragung der Messdaten über eine Standard-Ethernet-Schnittstelle erreicht werden können.

Um positionsgenaue Bilder zu generieren, wird ein Schrittzähler benötigt, der im Prototyp noch nicht verbaut ist. Deshalb können zunächst nur Messungen ohne Positionsrückmeldung durchgeführt werden.

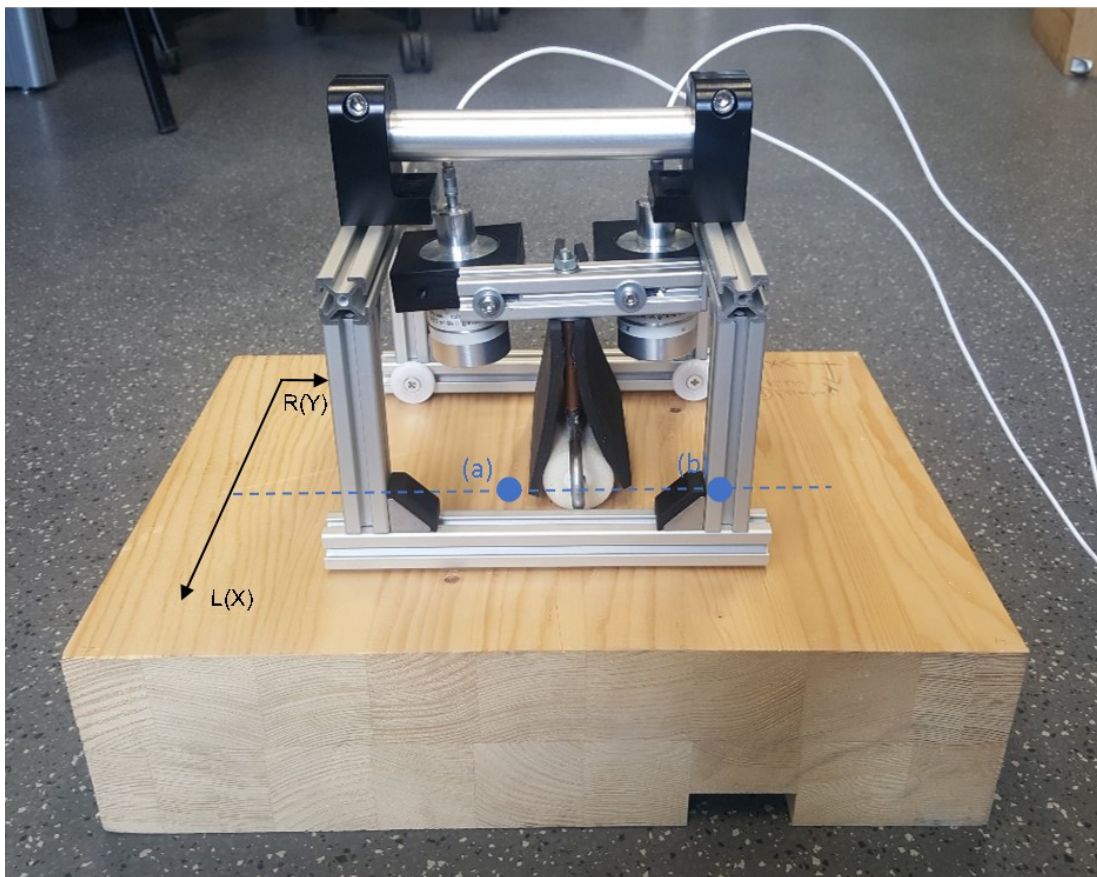


Abbildung 4.2: Prototyp des Handscanners auf einem Fichte-Probekörper aus 18 Kanthölzern und einer Nut als Fehlstelle. Zusätzlich sind die Positionen der A-Bilder (Punkt (a) und (b)) und des B-Bilds (gestrichelte Linie) eingetragen.

Ziel der Messungen ist eine grundlegende Machbarkeitsanalyse zur Abbildung und Ortung von Fehlstellen. Die Abbildungen bilden die Intensität des Ultraschallsignals über der Laufzeit ab. Als Probekörper dient ein Fichte-Leimholzquader mit den Bauteilmaßen von  $395 \times 300 \times 100 \text{ mm}^3$ , der in Abbildung 4.2 zu sehen ist. Der Probekörper besteht aus zwei Reihen Leimhölzern, die jeweils eine Kantenlänge von 50 mm haben. Die Fehlstelle ist eine Nut auf der Rückseite des Probekörpers, die sich über die gesamte Breite zieht. Die Nut hat eine Breite von 50 mm und eine Tiefe von 20 mm.

Zunächst wurde eine Einzelmessung im fehlerfreien Bereich durchgeführt (Abbildung 4.2, Position (a)). Die Messdaten werden für eine bessere Abbildung verstärkt und jeweils vier Messungen gemittelt. Das A-Bild in Abbildung 4.3a zeigt die Intensität im Bereich von 400-600  $\mu\text{s}$ . Bei 510  $\mu\text{s}$  wird ein leichter Ausschlag registriert, der das Rückwandecho zeigt. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist aufgrund der großen Dicke des Probekörpers gering (ca. Faktor 2,5). Das Rückwandecho liegt nur knapp über der Detektionsgrenze (in der Praxis oft: Faktor 2). Die Verwendung eines dünneren Probekörpers (mit dann kräftigerem Rückwandecho) wurde für diesen ersten Test verworfen, da die Signale von Fehlstelle und Rückwand sich ansonsten aufgrund der kurzen Zeitabstände überlagern würden. Damit wäre dann eine aufwändige Datenverarbeitung notwendig (z. B. Dekonvolution).

Für die zweite Messung wird das Messgerät über die Nut gestellt. In Abbildung 4.3b wird das Echo der Nut als A-Scan abgebildet. Bei 470  $\mu\text{s}$  wird ein kräftiges Echo registriert, das ca. 40  $\mu\text{s}$  früher empfangen wird als das Rückwandecho an Position (a).

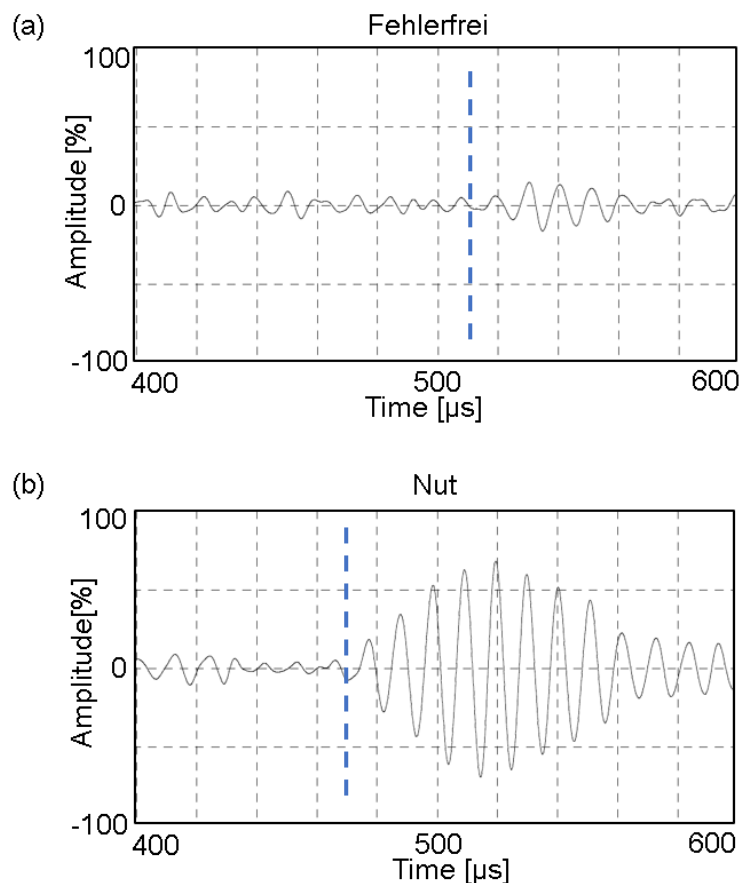


Abbildung 4.3: A-Bild eines fehlerfreien Bereichs (a) und der Nut als Fehlstelle (b).

Für die Erstellung einer Linienmessung wird das Messgerät einmal über das Bauteil gerollt (vgl. Abbildung 4.2, gestichelte Linie und Abbildung 4.4a). Dem Messsignal wurde die Amplitude bei einer bestimmten Messzeit (ca. 2 Sekunden) entnommen. Über dem unbeschädigten Teil des Objekts beträgt die Amplitude des Ultraschallechos ca. -18 dB. Über der Nut liegt die Amplitude jedoch bei -15 dB, da die Laufzeit verkürzt ist und sich das Signal dadurch nicht so stark abschwächen kann. Der Verlauf der Amplitude schwankt über die

gesamte Bauteillänge um bis zu 6 dB. Dennoch ist die Position der Nut in Abbildung 4.4b zu erkennen.

Die Detektion einer Minderdicke oder einer Nut erscheint also prinzipiell möglich. Eine quantitative Analyse muss allerdings noch folgen. Die Messergebnisse in Reflexion verdeutlichen jedoch, dass das Verfahren bei einem 100 mm dicken Probekörper an seine Grenzen gelangt.

Die Ergebnisse des Handscanners decken sich mit denen des stationären Scanners. Bei einer Vergleichsmessung mit dem stationären Scanner kann die vollständige Nut in einem C-Bild dargestellt werden.

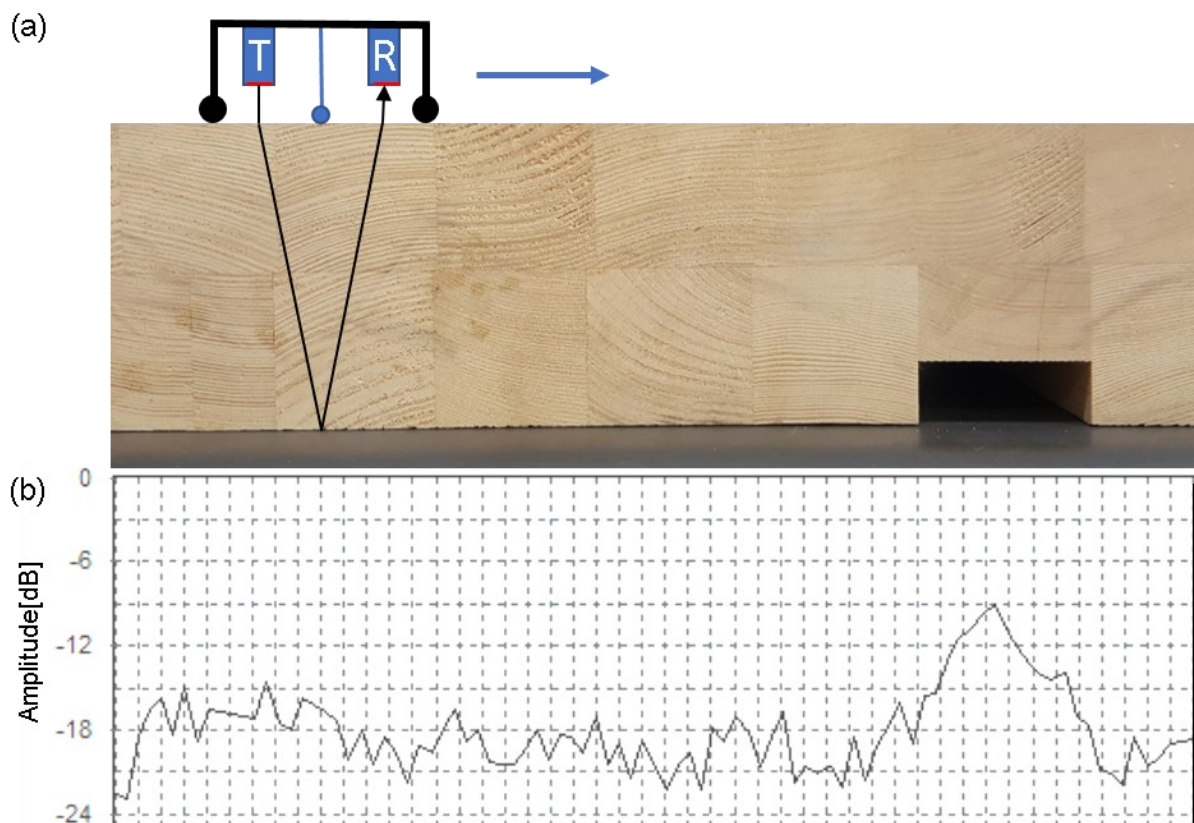


Abbildung 4.4: Ausschnitt des Leimholz-Probekörpers mit Fehlstelle und Messaufbau (a). Intensität des Empfangssignals entlang des Messweges entsprechend einer Messtiefe von  $x=84$  mm (b).

## 4.2 Holz-Strukturanalyse mit hochfrequentem Radar

Bei der Analyse des Stands der Technik und der Suche nach geeigneten ZfP-Verfahren für die Detektion von Fehlstellen im Holz fiel der Blick auch auf das hochfrequente Radarverfahren (vgl. 3.1.3.3). Dieses Verfahren bietet viele Vorteile für eine ZfP. Zunächst handelt es sich um eine kontaktlose Prüfung von Bauteilen. Zudem entsteht während der Messung keine gefährliche Strahlung. Das Gerät ist darüber hinaus kostengünstig und industrietauglich. Auch muss das Bauteil nur von einer Seite zugänglich sein, da, wie bei der Ultraschallmessung in Reflektion, ein *reflektiertes* Signal ausgewertet wird. Die Messung durch hochfrequentes Radar kann nicht nur Auskunft über die Form der Fehlstellen im Holz, sondern auch Informationen über deren Lage im Bauteil liefern. Der Scan kann ähnlich wie beim Ultraschallverfahren Schicht für Schicht durchgesehen werden, da vorhergehende Reflektionen ausgeblendet werden können. So kann beispielsweise die Oberflächenreflektion entfernt werden, um die darunter liegenden Fehlstellen abbilden zu können.

Um das Potenzial des Radar-Verfahrens auch für die Anwendung an Holz zu erschließen, wurden im Rahmen dieser Arbeit Versuche am Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FHR) durchgeführt. Für die Messungen wurde ein SAR („synthetic aperture radar“) genutzt [Pawliczek et al. 2018]. Die Antenne ist auf einem Scanner montiert, der eine vorher definierte Fläche abfahren kann. Der Bereich hinter dem Prüfobjekt wird mit Akustikplatten verkleidet, um störende Reflektionen zu unterdrücken (Abbildung 4.5). Um einen Probekörper zu scannen, wird die Radarantenne über die Oberfläche des Probekörpers geführt. Anschließend wurden alle Einzelmessungen zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Der Ablauf der Messung ist dabei analog zur Luftultraschallmessung.

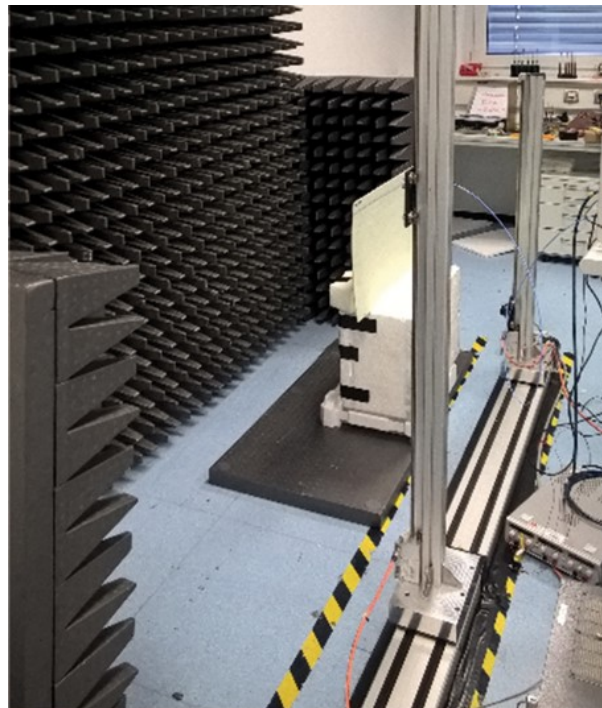


Abbildung 4.5: Messaufbau für hochfrequente Radaruntersuchung (bereitgestellt von Dr. Herschel, FHR).



Der für das Radar-Verfahren eingesetzte Radar-Chip hat ein Frequenzspektrum von 10-90 GHz. Durch die höheren Frequenzen im Vergleich zu den im Kapitel 4.3 verwendeten Antennen, soll eine höhere Auflösung, und dadurch eine verbesserte Fehlererkennung erreicht werden. Durch eine platzsparende Silizium-Germanium-Technologie kann die gesamte Schaltung auf  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  integriert werden [Herschel et al. 2015]. Dadurch kann das komplette Radarmodul in einem kompakten Gehäuse untergebracht werden. Die robuste Bauform und das gegen Staub und Hitze unempfindliche Radarverfahren ermöglichen eine Nutzung auch unter widrigen Bedingungen, die beispielsweise in der industriellen Fertigung von Plattenwerkstoffen vorkommen.

Durch eine neue Halbleitertechnologie sind mittlerweile Frequenzbereiche realisierbar, die auch für den Nahbereich von wenigen Zentimetern gut geeignet sind [Demming et al. 2013]. Ursprünglich war dieses Verfahren für den Fernbereich entwickelt worden.

Das Potenzial des Radarverfahrens kann beispielhaft an dem bereits verwendeten Fichteprobekörper mit künstlichen Fehlstellen gezeigt werden (Abbildung 4.6) (vgl. 3.1.2). Der Probekörper mit den Maßen  $500 \times 400 \times 90 \text{ mm}^3$  ( $l \times b \times h$ ) besteht aus zwei Lagen mit jeweils acht miteinander verklebten Kanthölzern. Von der Unterseite ausgehend wurde in den Probekörper zwölf Bohrungen mit einem Durchmesser von 20 mm und unterschiedlicher Tiefe eingebracht. Die Bohrungen 4-9 sind kegelförmig ausgefräst, der Rest hat eine Flachbodenbohrung.

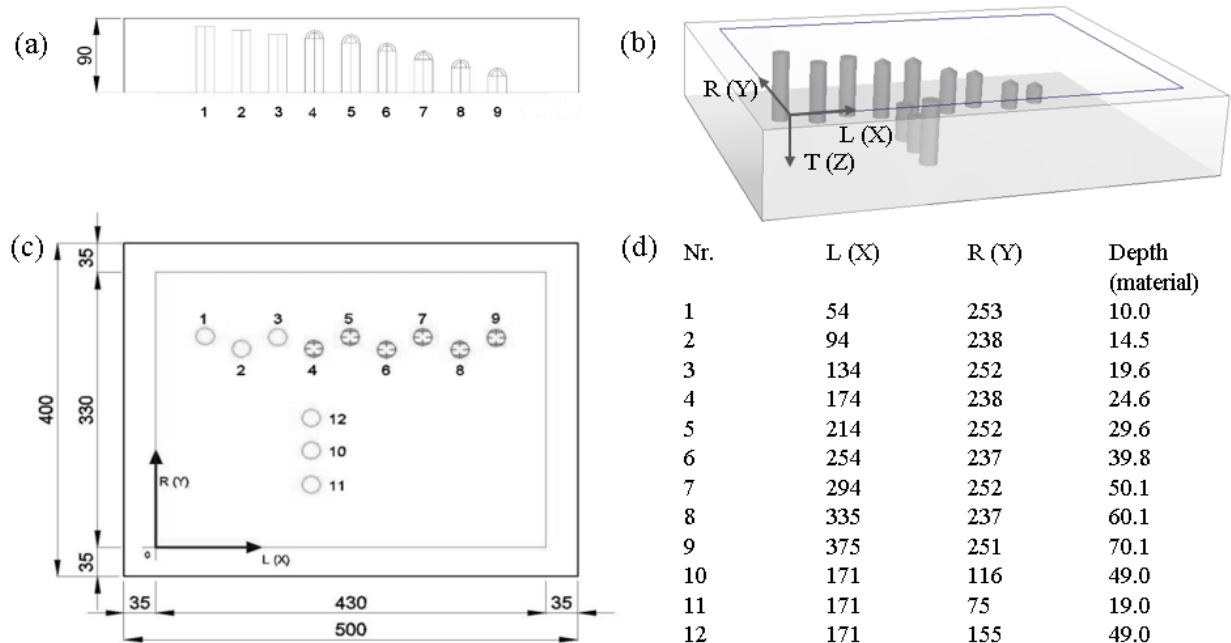


Abbildung 4.6: Aufbau des Fichteprobekörpers mit 12 Bohrungen in Seitenansicht (a), Raumansicht (b) und Draufsicht (c). Das Koordinatensystem zeigt das Messfeld. Die Lage der Bohrungen und ihre Tiefe kann der Tabelle (d) entnommen werden.

Vom FHR wurde eine einzige Messung durchgeführt, um die allgemeine Funktionsfähigkeit des Verfahrens zu demonstrieren. Die Rohdaten wurden nicht weiterbearbeitet. Der Versuch

wurde mit Frequenzen von 80 GHz in Reflektion durchgeführt. Der Abstand der einzelnen Messpunkte zueinander lag bei 0,7 mm.

Abbildung 4.7 verdeutlicht die Möglichkeit der schichtweisen Untersuchung des Probekörpers. Abbildung 4.7a zeigt das C-Bild des Probekörpers in einer Tiefe von 14 mm mit der gut sichtbaren Bohrung 2. Das C-Bild in Abbildung 4.7b befindet sich in einer Tiefe von 20 mm. Die Bohrungen 3 und 11 sind gut zu erkennen, wohingegen die Bohrungen 1 und 2 nur noch unscharf abgebildet werden. Tiefergelegene Bohrungen sind nicht zu sehen.

Die Ergebnisse mit hochfrequentem Radar an Holzprobekörpern sind vielversprechend. Es konnte eine Eindringtiefe von ca. 25 mm erreicht werden. Bei der isolierten Betrachtung der Ergebnisse, das heißt nach Ausblendung der Oberflächenreflektion, können die Bohrungen 1-3 und 11 abgebildet werden. Dies sind alle Fehlstellen, die sich bis zu 25 mm unter der Oberfläche befinden. Darunter liegende Bohrungen konnten aufgrund der limitierten Eindringtiefe nicht mehr sichtbar gemacht werden.

Verbesserungspotenzial besteht in der Optimierung der Frequenz, wodurch sich die Eindringtiefe (bei Erniedrigung) bzw. Auflösung (bei Erhöhung) erhöhen ließe.

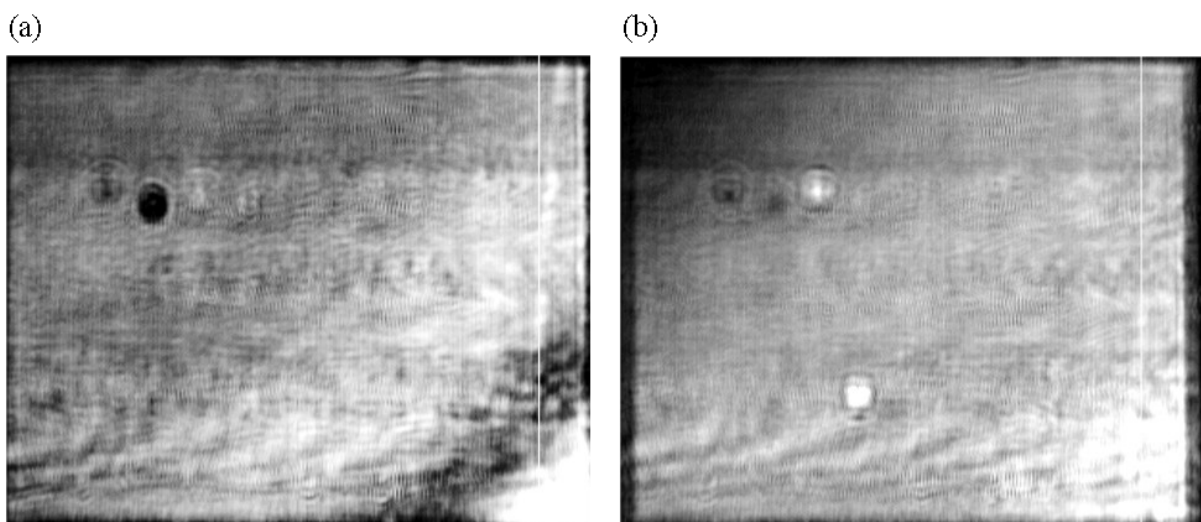


Abbildung 4.7: Hochfrequentes 80 GHz Radargram (C-Bild) in einer Tiefe von 14 mm (a) und 20 mm (b) (bereitgestellt von Dr. Herschel, FHR, Juni 2017).

Ein Nachteil des Verfahrens ist die relativ lange Messdauer. Die Messung des Fichteprobekörpers dauerte ca. 30 Minuten bei einem Messpunktabstand von 0,7 mm. Würde man mehrere Antennen nebeneinander in einem Modul integrieren, ist eine deutliche Beschleunigung möglich.

Das Radarverfahren ist jedoch nicht für alle Fragestellungen geeignet. Die physikalischen Grundlagen des Verfahrens und der derzeitige Entwicklungsstand sorgen dafür, dass das Ultraschallverfahren hinsichtlich der Eindringtiefe und der Detektionsfähigkeit sehr kleiner Delaminationen zur Zeit noch überlegen ist.

### 4.3 Ortung von Fachwerk mit niederfrequentem Radar

Auch niederfrequentes Radar kann für die Untersuchung von Holzbauteilen genutzt werden (vgl. 3.1.3.3). Mit diesem Verfahren lassen sich nicht nur verschiedene Materialien orten, sondern auch im Querschnitt geschwächte Strukturen detektieren [Fujii et al. 2013; Macchioni et al. 2013]. Auch wenn nach jetzigem Forschungsstand mit niederfrequentem Radar noch keine genauen Aussagen zu Ausmaß und Art von Fehlern in Holzbauteilen getroffen werden können, eignet sich das Verfahren dennoch, um eine erste Einschätzung des Materialzustandes zu liefern. So konnte in den beiden Referenzen beispielsweise die Kontur des Probekörpers abgebildet werden.

Im Rahmen eines Sanierungsvorhabens am Schloss auf der Pfaueninsel in Potsdam konnte die Ortung von Fachwerk erprobt werden (Abbildung 4.8). Das Fachwerk liegt hinter einer vorgesetzten Fassade aus Holz, das mit einer wasserundurchlässigen Kunststoffhaut überzogen wurde. Die Folie wurde in den 70er Jahren in Folge von Sanierungsarbeiten an der gesamten Fassade angebracht, um das darunterliegende Holz vor Witterungseinflüssen zu schützen.



Abbildung 4.8: Südwestansicht des Schlosses auf der Pfaueninsel.

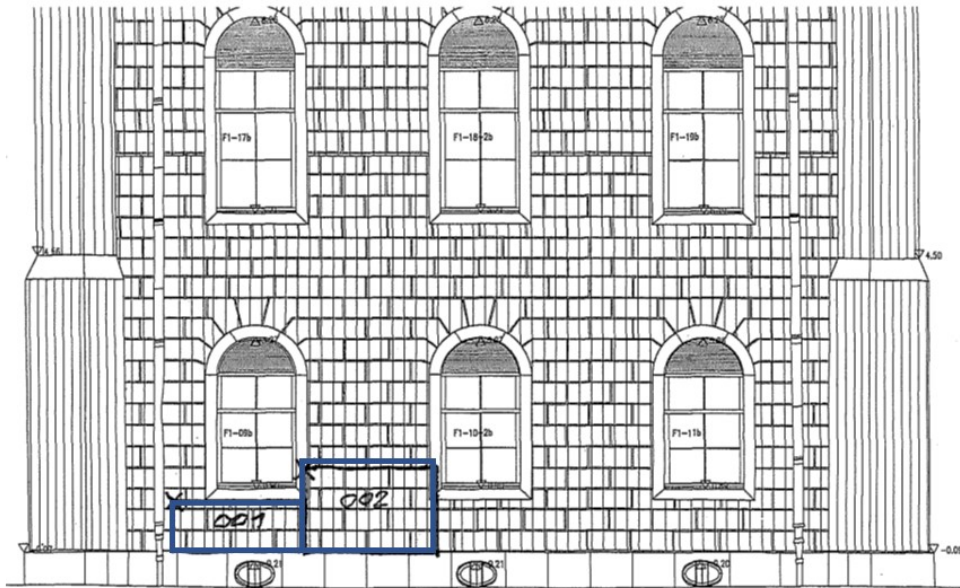
Im Laufe der Jahre wurde die Schutzschicht undicht, und Wasser konnte hinter die Fassade gelangen – durch die Folie jedoch nicht mehr so gut abfließen. Die Folge war eine Zersetzung der Holzsubstanz der Fachwerkbalken durch holzerstörende Pilze. Für die Planung der Instandhaltungsmaßnahmen sollte zuerst das Ausmaß des Schadens bestimmt werden.

Für die Flächenmessung kommt das GSSI SIR 20 mit einer 2 GHz Radarantenne zum Einsatz, dessen Messaufbau in Abbildung 4.9 dargestellt ist. Der Abstand zwischen den einzelnen Messlinien beträgt 5 cm. Es wird sowohl horizontal als auch vertikal gemessen. Die Messungen sollen zum einen die Lage des verdeckten Fachwerks orten, zum anderen Rückschlüsse auf den Zustand von dessen Holzbalken liefern. Da die elektromagnetischen Wellen durch einen höheren Feuchtegehalt zusätzlich gedämpft werden, sollte überprüft werden, ob sich auch durch Wassereintritt verursachte Schädigungen in der Fachwerkskonstruktion detektieren lassen.

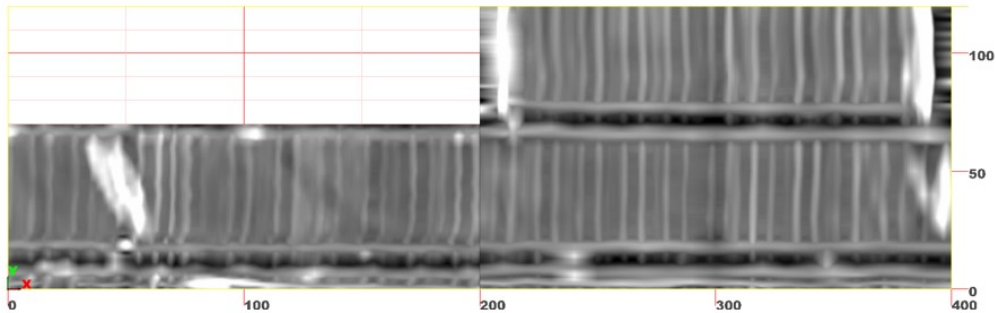


Abbildung 4.9: Radarmessung an der Schlossfassade mit dem GSSI SIR 20 und einer 2 GHz Radarantenne.

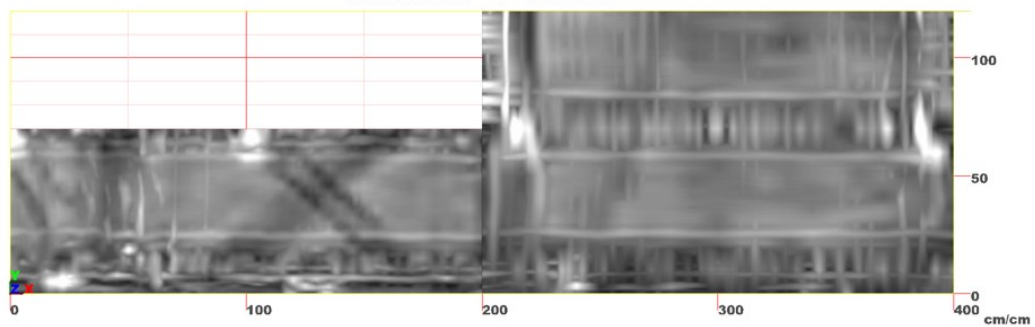
Nachdem die einzelnen B-Bilder in einem C-Bild dargestellt wurden, ist eine Ortung der Balkenlage möglich (Abbildung 4.10). Durch den Permittivitätskontrast von Holz, Mauerwerk und der dazwischen liegenden Luft können diese Materialien unterschieden werden.



Schnitt in 3 – 5 cm Tiefe



Schnitt in 5 – 7 cm Tiefe



Schnitt in 14 – 16 cm Tiefe

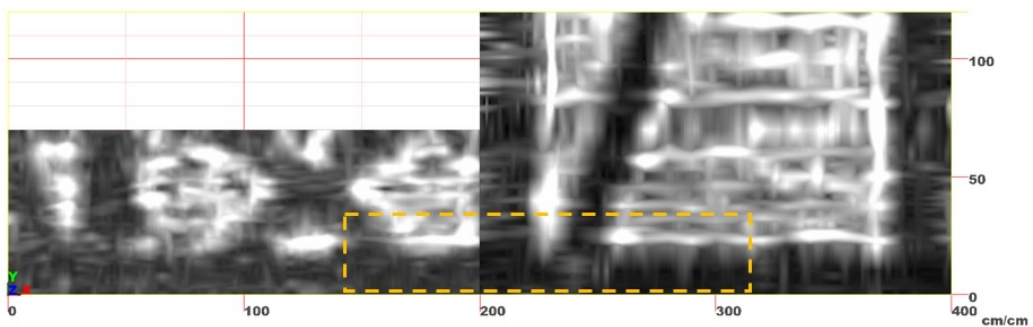


Abbildung 4.10: Messfeld 1 und 2 an der Nordostfassade des Schlosses auf der Pfaueninsel. Nachfolgend drei Tiefenschnitte mit den zusammengesetzten Messfeldern 1 und 2. Die gestrichelte Linie in der untersten Abbildung zeigt den Bereich der später geöffneten Fassade.

In einer Tiefe von 3-5 cm ist die Bretterfassade, die durch die Kunststoffhaut verdeckt wird, erkennbar. In einer Tiefe von 5-7 cm ist die Konterlattung, an der die Außenbretter befestigt sind, zu sehen. Im letzten Schnitt bei einer Tiefe von 14-16 cm ist die Fachwerkkonstruktion mit Schwelle, Pfosten, Strebe und Andreaskreuz sichtbar. Alle Elemente erscheinen mit ähnlicher Amplitude – es zeigen sich keine lokalen Auffälligkeiten, die als Hinweis auf Schäden gewertet werden könnten. Allerdings kam es durch den warmen und sehr trockenen Sommer 2018 vermutlich zu einem Austrocknen der gesamten Fassade. Vermutlich konnten daher bei dem Messeinsatz im September 2018 keine Feuchtenester detektiert werden. Eine Einschätzung der Bausubstanz hinsichtlich potenzieller Schädigungen konnte demzufolge nicht vorgenommen werden.

Ein Jahr später im Sommer 2019 konnten die Ergebnisse am Schloss verifiziert werden. Die fortgeschrittenen Restaurationsmaßnahmen ermöglichten ein Öffnen der Fassade an den zuvor aufgenommenen Messfeldern (Abbildung 4.11). Da für diesen Untersuchungsgegenstand noch keine Erfahrungswerte vorlagen, war ein visueller Abgleich der Messergebnisse mit der geöffneten Fassade hilfreich.

Nachdem die Fassade geöffnet wurde, konnten die Messergebnisse bestätigt werden. Das Fachwerk macht bei einer ersten visuellen Kontrolle einen intakten Eindruck. Nur im Kontaktbereich zwischen Steinsockel und Schwelle ist an zwei Stellen eine Zersetzung der Holzsubstanz erkennbar.



Abbildung 4.11: Fachwerk hinter der geöffneten Fassade.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen können Folgeuntersuchungen eingeleitet werden. So könnten die Ergebnisse der Fachwerklokalisierung dazu genutzt werden, mit dem Bohrwiderstand-Verfahren die detektierte Balkenlage punktuell auf ihren Zustand hin zu überprüfen, ohne die Fassade komplett entfernen zu müssen. Das berührungslose Luftultraschall-Verfahren würde sich eignen, um den Zustand der Balkenlage (allerdings nach

Entfernen der Fassade) genauer zu überprüfen. Da das Messgerät zum Untersuchungszeitpunkt nicht für den mobilen Einsatz vorbereitet war, konnten die Versuche noch nicht durchgeführt werden. Generell sollten solche Untersuchungen zuerst an besonders kritischen Punkten, beispielsweise beim Übergang von Sockel zum Fachwerk, oder an den Fallrohren der Regenrinne, erfolgen. An diesen Stellen ist der Wassereintritt nämlich zuerst zu befürchten.

## 4.4 Verifizierung einer Ultraschallmessung mit dem Bohrwiderstandsverfahren

Messungen mit luftgekoppeltem Ultraschall können mit solchen des allerdings – teilzerstörenden – Bohrwiderstands-Verfahrens verglichen werden, um die Richtigkeit der Ergebnisse zu überprüfen. Das Verfahren wird in Abschnitt 3.1.3.5 erläutert. Als Beispiel dienen Messungen an dem in Abschnitt 3.3.4 vorgestellten Dachbalken aus Fichtenholz, der unterschiedlich stark von Braunfäule befallen war.

Da der Ultraschall vom gesunden Holz deutlich weniger gedämpft wird als vom zerstörten Holz, bildet sich ein starker Kontrast aus. Das aufgenommene C-Bild (vgl. Kapitel 3.3, Abb. 3.21) zeigt im hellgrauen Bereich gesundes und im blau markierten, verfaultes Holz. An den drei Positionen a, b und c ist eine Abstufung der Farbintensität sichtbar.

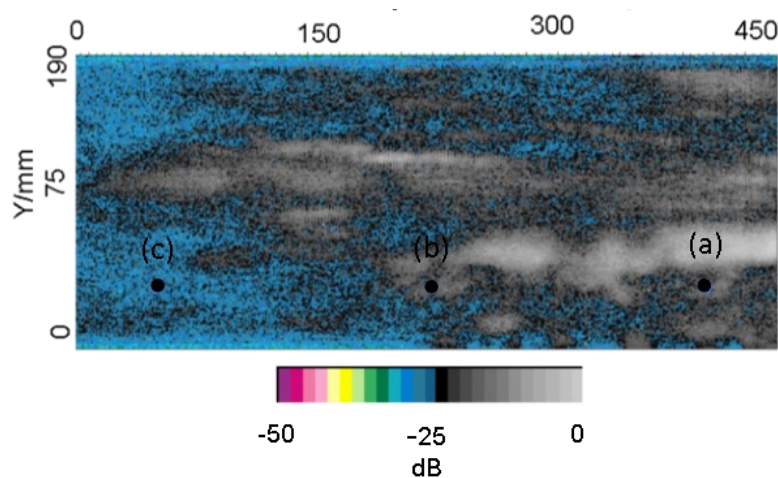


Abbildung 4.12: Ein mit Braunfäule zersetzter Balken und der dazugehörige C-Scan in Durchschallung (90kHz) und die Markierungen (a-c) der Kontrollbohrungen.

An dem Dachbalken, der vor ca. acht Jahren aus einer Industriehalle ausgebaut und für spätere Tests eingelagert wurde, wurden drei Messungen durchgeführt. Für die Messungen wurde der Resistograph IML RESI E400 verwendet, mit dem eine Bohrung vorgenommen und direkt ausgewertet werden kann. Die drei Graphen in Abbildung 4.13 zeigen den Widerstand im Holz entlang der Bohrtiefe. Der größeren Anschaulichkeit wegen wurde der Balken mit den Bohrmarkierungen a-c abgebildet (Abbildung 4.12).

Graph 4.13a zeigt die Ergebnisse der Messung im gesunden Bereich des Balkens. Direkt beim Eintritt des Bohrers in das Holz steigt der Bohrwiderstand an und bleibt bis zum Austritt ungefähr auf einer Höhe. Durch den Wechsel von Früh- und Spätholz kommt es ab 60 mm zu einem verstärkten An- und Abswellen der Amplitude. Das festere Spätholz mit einer höheren Dichte führt zu einem Anstieg des Bohrwiderstandes um bis zu 100 %. Über den gesamten Querschnitt hinweg ist der Widerstand im Verhältnis zu anderen Holzarten gering, da es sich um weiches Nadelholz mit geringer Dichte handelt.

Die zweite Messung abgebildet in Graph 4.13b wurde an einem schon teilweise zersetzten Bereich des Balkens durchgeführt. Insbesondere bei 20 mm und zwischen 35-60 mm ist die



gesamte Holzstruktur zerstört. Der Bohrer hat in diesem Bereich keinerlei Widerstand mehr zu überwinden.

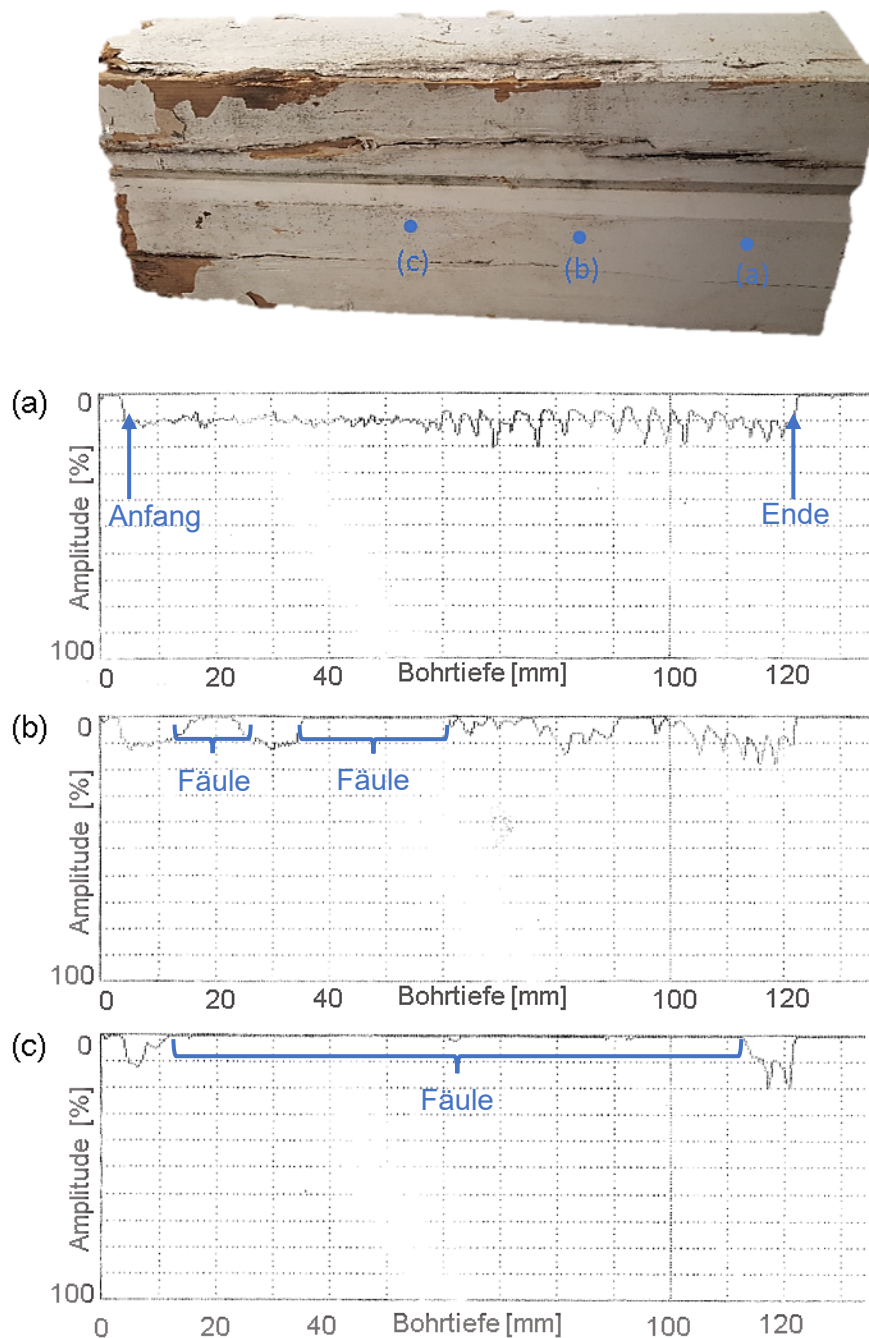


Abbildung 4.13: Der zersetzte Balken mit Bohrmarkierungen und die Graphen a-c mit dem Bohrwiderstand an drei Messpunkten.

Der Querschnitt in Graph 4.13c betrifft einen fast völlig zerstörten Bereich des Holzbalkens. Nur an einem schmalen Randstreifen direkt an den Außenseiten ist ein kurzer Anstieg des Widerstands sichtbar. Der Balken wirkt von außen intakt, innerlich ist er durch den Pilzbefall aber schon völlig zersetzt. Dieses Phänomen zeigt, dass man sich bei der Prüfung eines Bauteils nicht auf den Augenschein verlassen darf, sondern durch geeignete Prüfverfahren innenliegende Defekte sichtbar machen muss.

Die Kontrollmessungen haben gezeigt, dass mit dem Bohrwiderstandsverfahren die Ultraschallmessung verifiziert werden kann. Die drei Bohrungen geben den Zustand des Bauteils exakt wieder und passen sehr gut zu den Aussagen über den Zerstörungsgrad die zuvor aufgrund des C-Bildes getroffen wurden. Mit dem Bohrwiderstandsverfahren können drei Zerstörungsgrade – gesund, teilzerstört, zerstört – erkannt und jeweils dem C-Bild zugeordnet werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Das primäre Anwendungsgebiet der ZfP im Bauwesen ist die Prüfung von Beton beispielsweise in Straßen, Brücken und Gebäuden. Viele Verfahren und Geräte aus diesem Anwendungsbereich können auch für die Prüfung anderer Materialien eingesetzt werden. So können das Ultraschall- und Radarverfahren ebenfalls für Holzbauteile verwendet und für diesen Materialbereich weiterentwickelt werden. Beton und Holz ist ein heterogener Aufbau gemeinsam. Auch die Fehlstellen, die im Bauteil detektiert werden sollen, ähneln sich. Delaminationen, Risse und Hohlräume stellen bei beiden Materialien eine große Herausforderung für den Prüfer dar. Beim Holz mit seinem anisotropen Aufbau und den damit bei Beschallung verbundenen unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten sind zusätzliche Faktoren zu berücksichtigen. Die Ultraschallgeräte A1220 Monolith und A1040 MIRA wurden ursprünglich für den Einsatz an Betonbauteilen entwickelt, fanden später dann aber auch an Holz Anwendung [Krause et al. 2014].

Die Luftultraschalltechnologie ist eine bewährte Technik und war ursprünglich für die Prüfung von Komposit-Werkstoffen gedacht [Gaal et al. 2012]. Auch dieses Verfahren wurde an der BAM zuvor bereits für Messungen an Betonbauteilen genutzt [Gräfe 2008]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte die Eignung des luftgekoppelten Ultraschalles an Holzwerkstoffen demonstriert, seine Einsatzmöglichkeiten weiterentwickelt und durch Bohrwiderstandsmessungen bestätigt werden.

Prüfverfahren mit hoch- und niederfrequentem Radar wurden im Rahmen dieser Arbeit in Testversuchen zur ZfP von Holz ebenfalls erfolgreich eingesetzt. Ein niederfrequentes Radargerät kam an der BAM sowohl an Beton als auch an Holz ebenso schon zur Anwendung [Kind 2015].

Die genannten Prüfverfahren wurden in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt. Dadurch haben sich neue Anwendungsfelder und technische Möglichkeiten aufgetan, die eine neuerliche Betrachtung der Prüfverfahren rechtfertigen.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Untersuchung mit Luftultraschall- und Radartechnologie noch einmal im Überblick dargestellt werden, ehe die praktischen Anwendungsbereiche und die Grenzen der untersuchten Prüfverfahren benannt und Perspektiven für ihre Weiterentwicklung aufgezeigt werden.

## 5.1 Untersuchungen mit luftgekoppeltem Ultraschall

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden neuartige Prüfköpfe aus zellulärem Polypropylen verwendet, um Probekörper zu durchschallen, deren Zustand aufgrund ihrer Dicke oder Struktur mit herkömmlicher Technik nur in geringer Qualität oder gar nicht analysiert werden kann. Diese ersten Versuche wurden in Durchschallungsanordnung durchgeführt. Im nächsten Schritt wurde ein neues Prüfverfahren in Reflektionsanordnung entwickelt, um eine ZfP bei Holzbauteilen zu ermöglichen, die nur von einer Seite aus zugänglich sind (vgl. 2.2.5).

Luftgekoppelter Ultraschall bedarf keiner direkten Ankopplung der Prüfköpfe an das Bauteil (vgl. 2.2.6). Nur bei sehr verwitterten oder durch Fäule zersetzten Oberflächen ist eine Vorbehandlung, beispielsweise Schleifen oder Hobeln, erforderlich.

Als Probekörper dienten verschiedene Holzwerkstoffe, die zunächst in Bezug auf ihre akustischen Eigenschaften analysiert wurden, da es unter ihnen teilweise große Unterschiede hinsichtlich der Schallgeschwindigkeit und -schwächung gibt (vgl. 2.2.3 und 2.2.4). Es wurde ein besonderes Augenmerk auf Werkstoffe gelegt, denen schon heute und auch zukünftig große Bedeutung zukommt, in erster Linie Furnierschichtholz (LVL) und Brettschichtholz (Glulam). Diese Produkte sind in der Regel aus Nadelhölzern (Fichte, Kiefer) oder Buche. Besonders wichtig ist hierbei die Detektion von Fehlverklebungen, da die Produkte häufig im sicherheitsrelevanten Bereich verbaut werden (vgl. 2.1.4). Neben diesen Materialien wurden aber auch MDF, Spanplatten und Multiplex untersucht.

Für die luftgekoppelten Ultraschallmessungen an Holzwerkstoffen wurden zuerst die passenden Ultraschallwandler ausgewählt. Dafür wurden die zellulären PP-Wandler mit marktüblichen piezokeramischen Wandlern hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit verglichen (vgl. 3.3.5).

Untersucht wurden Wandler mit Frequenzen zwischen 60 kHz und 250 kHz. Zusätzlich wurden fokussierende und nichtfokussierende Wandler und verschiedene Wandlerdurchmesser hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit für verschiedene Holzwerkstoffe untersucht. Allein die Änderung der Frequenzen führte zu signifikanten Änderungen der Messergebnisse.

Durch diese vergleichenden Messungen konnten die optimalen Ultraschallwandler zur Prüfung von Holzbauteilen ermittelt werden. Es zeigte sich, dass Wandler mit einer Frequenz von 90 kHz die besten Ergebnisse für die Prüfung von Holzbauteilen ab 50 mm Dicke liefern. Bei Probekörpern mit Abmessungen von unter 50 mm Dicke kann die Prüffrequenz in Transmission erhöht werden, um eine bessere Auflösung zu erzielen (ca. 200 kHz). Vorher definierte Fehlstellen im Holz, wie zum Beispiel Bohrungen, Risse und Delamination zeigen sich im A-Bild in einer abgeschwächten Amplitude oder einer verlängerten Laufzeit. Großflächige Abschattungen in den C-Bildern deuten dabei auf eine Delamination hin, kleinere Abschattungen hingegen auf Insektenbefall oder Astlöcher. Risse erscheinen je nach Ausrichtung als Linie oder flächig.

Durch die Optimierung der Prüfköpfe und Prüffrequenzen konnten hohe Eindringtiefen im Holz bei einer gleichzeitigen hohen Auflösung der Fehlstellen erzielt werden. Im Rahmen der umfangreichen Versuchsreihe mit unterschiedlichen Wandlern und Frequenzen konnte gezeigt werden, dass die empfangenen Signale der zellulären PP-Wandler, im Vergleich mit piezokeramischen Wandlern, bis zu dreimal so stark sind bzw. die Amplitude um ca. 6 dB erhöht wird. Bei einigen Probekörpern konnte die maximale Eindringtiefe von 100 mm mit piezokeramischen Wandlern auf 300 mm mit zellulären PP Wandlern vergrößert werden. Dadurch eröffnen sich neue Anwendungsfelder für die zerstörungsfreie Prüfung von Holzbauteilen. So rückt beispielsweise die Detektion von Fehlstellen bis 200 mm Dicke und unter  $500 \text{ kg/m}^3$  Dichte in Transmission in den Bereich des Möglichen. Größere Probekörper mit künstlichen Fehlstellen wurden aufgrund der begrenzten Abmaße des Scanners nicht gebaut. Deshalb kann keine Aussage darüber getroffen werden, bis zu welchen maximalen Abmaßen eines Bauteils darin enthaltene Fehlstellen detektiert werden können.

Mit dem Einbau eines Hochspannungsmoduls mit einer Spannung von maximal 2 kV konnte die Empfindlichkeit des Ultraschallwandlers zusätzlich um  $15 \pm 1$  dB erhöht werden (vgl. 3.2.4). Dadurch konnte der Kontrast in der Abbildung zwischen Fehlstelle und unbeschädigter Holzsubstanz vergrößert und somit die Abbildungsgenauigkeit verbessert werden.

Fehlerfreie Platten wurden mit dem Ziel der Detektion von Rückwandeckos durchschallt. Bei Materialien mit geringer Dichte und großem Porenanteil, beispielsweise leichten Spanplatten mit einer Dichte von unter  $300 \text{ kg/m}^3$ , war die Abbildung der Rückwand, aufgrund der starken Streuung, nur bei dünnen Platten möglich ( $\leq 50$  mm). Mit piezoelektrischen Wandlern konnten keine Rückwandeckos detektiert werden. Bis zu einem gewissen Grad führte zunehmende Dichte zu einer verbesserten Durchschallbarkeit. Hochverdichtete Faserplatten ließen sich z.B. auch bei Querschnitten von über 100 mm gut prüfen.

Auch die Anisotropie im Holz hat einen großen Einfluss auf die Messergebnisse (vgl. 2.1.1). Außerdem beeinflussen auch die Partikelgröße und die Schichtdicke der Materialien das Messergebnis. Wenn die Größe der Partikel abnimmt, sinkt der Einfluss der Anisotropie auf das Messergebnis.

Neben der Anisotropie, der Partikelgröße und der Schichtdicke hat auch der Schichtaufbau von vielen Holzwerkstoffen Einfluss auf das Messsignal. Der häufige Wechsel von Holz und Klebstoff führt zu einer Schwächung des Signals. So wird das Ultraschallsignal in Furnierschichtholz stärker geschwächt als in Brettschichtholz, bei dem es prozentual weniger verklebte Schichten gibt.

Die Detektion von Holzfäule ist in Durchschallung gut möglich. Anhand eines mit Braunfäule befallenen Balkens konnten verschiedene Stadien des Befalls abgebildet werden. Ein Befall durch Braunfäule zeichnete sich durch eine höhere Dämpfung aus, die aus einer verstärkten Streuung des Signals resultierte. Gesundes Holz streute das Ultraschallsignal hingegen weniger stark. Die Ultraschallmessung konnte in einem zweiten Schritt mit dem

Bohrwiderstandsverfahren verifiziert werden (vgl. 4.4). Neben der Bauteildicke konnte mit diesem Verfahren das genaue Ausmaß der Holzzerstörung festgestellt werden.

Bei der Entwicklung eines Prüfverfahrens für Holzbauteile in Reflektion konnten verschiedene Fehlstellen in Plattenwerkstoffen abgebildet werden, die bei der Herstellung der Platten entstehen und deren Beseitigung hohe Kosten verursacht (vgl. 3.4.3). Eine zusätzliche Abschirmvorrichtung zur Vermeidung von Oberflächenwellen ermöglicht die Detektion von Fehlstellen in 40 mm starken Platten. Abhängig von Lage und Größe der Fehlstelle ist auch eine Überprüfung von 100 mm dickem Leimholz möglich. Die Abschirmvorrichtung ist so konstruiert, dass sie nahezu verschleißfrei bei geringer Geräuschentwicklung zum Probekörper hin abdichtet. Darüber hinaus verhindert die Abschirmung, die anhand einer Schaumstoffrolle über das Bauteil geführt wird, auch ein direktes Übersprechen des Ultraschalls von Sender auf Empfänger über die Luft.

Messungen an Probekörpern mit Fehlstellen in unterschiedlicher Tiefe haben ergeben, dass eine Tiefenbestimmung von Reflektoren in Holzwerkstoffen möglich ist. In dem Versuch konnte gezeigt werden, dass die Tiefenunterschiede der Delaminationen mit einer Genauigkeit von 10 mm bestimmt werden können. Anhand der Laufzeit und der Schallgeschwindigkeit im Material kann die Tiefe des Reflektors berechnet werden.

In der Holzwerkstoffindustrie sind nach Aussage eines führenden Herstellers Fehlstellen ab ca. 100 x 100 mm von Bedeutung und müssten ab dieser Größe detektiert werden können. Bei der Herstellung der Probekörper wurden deshalb insbesondere solche Fehlstellen berücksichtigt. Fehler dieser Größenordnung konnten mit beiden Versuchsanordnungen für die meisten Platten detektiert werden. Dabei ist es bedeutungslos, ob es sich bei der Fehlstelle um eine Delamination, einen Riss oder eine Bohrung handelt. Sobald sich im Bauteil ein beliebig dicker Luftspalt befindet, wird nahezu das gesamte Signal reflektiert. Es ist somit nicht möglich, zwischen den genannten Fehlstellen anhand des empfangenen Ultraschallsignals zu unterscheiden. Kleinere Fehlstellen, wie zum Beispiel Bohrungen mit einem Durchmesser von unter 10 mm, konnten den Bildern nicht klar zugeordnet werden.

Bei der Messung in Reflektion entstehen Oberflächenwellen, die eine tote Zone von ca. 10 mm verursachen. Bis zu dieser Tiefe werden etwaige Fehlstellenechos von Signalen der Oberflächenwellen überlagert, sodass eine Auswertung nur schwer möglich ist (vgl. 3.4.3).

Neben der Detektion von künstlichen Fehlstellen wurden auch Versuche an unverarbeiteten Holzwerkstoffen durchgeführt, um natürliche Wuchsmerkmale im Holz abzubilden. Luftultraschall kann dazu genutzt werden, die Schnittholzsortierung zu überwachen. Werden die Produkte nach dem Einschnitt per Ultraschall gescannt, können sie in die verschiedenen Schnittholzklassen einsortiert werden. Die Versuche haben gezeigt, dass die Detektion von Astlöchern, Faserrichtung, Pilz- und Insektenbefall gut möglich ist. Mit diesen Informationen können beschädigte Bereiche herausgeschnitten oder aussortiert werden. Fehlerfreie Bereiche können für Werkstoffe hoher Qualität verwendet werden, bei denen fast keine natürlichen Holzfehler toleriert werden.

Das neu entwickelte mobile Ultraschallmessgerät ermöglicht die Erstellung von Punkt-, und Linienmessungen in Reflektion. Mit diesen Bildern konnten Minderdicken in einem Probekörper aus Fichten-Leimholz abgebildet werden. Das Messgerät kann unabhängig von einem stationären Scanner betrieben werden und ermöglicht somit einen Einsatz in Bauteilen, die nicht transportabel oder zu groß für den Scanner sind.

Im Vergleich zu früheren Versuchen [Sanabria 2012; Stöbel 2004] mit piezokeramischen Prüfköpfen zeichnen sich die Messergebnisse mit Prüfköpfen aus zellulärem PP dadurch aus, dass eine höhere Eindringtiefe und ein stärkerer Kontrast zwischen unbeschädigtem Probekörper und Defekt erreicht werden kann. Eine Messung in Reflektion mit luftgekoppeltem Ultraschall an Holz wurde in dieser Form bis jetzt nicht durchgeführt. Im Vergleich zu Messungen mit Punktkontaktprüfköpfen von [Hasenstab 2006; Lee et al. 2011] kann mit dem gewählten Messaufbau eine deutlich höhere Auflösung und Messgeschwindigkeit erreicht werden.

## 5.2 Untersuchungen mit Radar

Da Radar ein berührungsloses und – anders als die Radiographie – gesundheitlich unbedenkliches Verfahren ist, eignet es sich auch zur Prüfung von Holzbauteilen (vgl. 3.1.3.3). Die Geräte sind darüber hinaus kostengünstig und industrietauglich.

Hochfrequentes Radar mit einer Frequenz von 80 GHz ermöglicht beispielsweise die Detektion von Minderdicken in Holzbauteilen bis zu einer Tiefe von 25 mm. Daher eignet sich das Verfahren zurzeit nur für Plattenwerkstoffe geringer Dicke (<25 mm). Die Versuche wurden am Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FHR) in Wachtberg bei Bonn durchgeführt (vgl. 4.2).

Im Vergleich zu früheren Versuchen [Macchioni et al. 2013] zeichnen sich die Messergebnisse mit hochfrequentem Radar in Reflektion durch eine extrem hohe Auflösung aus. Es konnten Bohrungen mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Tiefe von 25 mm akkurat abgebildet werden.

Niedrigere Frequenzen ermöglichen hingegen eine höhere Eindringtiefe, sodass Messungen auch an größeren Bauteilen denkbar sind. Radar mit Frequenzen von 2 GHz eignet sich zur Ortung von verdeckten Holzbauteilen. Untersuchungen am Schloss auf der Pfaueninsel in Berlin haben ergeben, dass das Verfahren gut zwischen verschiedenen Materialien und Schichtaufbauten unterscheiden kann. So konnten am Schloss das verdeckte Fachwerk, trotz vorgehängter Fassade, geortet werden (vgl. 4.3). Aufgrund der Trockenheit konnten im Holz selbst aber keine Differenzen und somit auch keine Schäden detektiert werden.

Die genaue Ortung der Bauteillage kann dazu genutzt werden, mit anderen Prüfverfahren, beispielsweise mit dem Bohrwiderstand, den Zustand des Bauwerks an besonders kritischen Punkten zu überprüfen. Kontrollmessungen, die den Bohrwiderstand genutzt haben, waren in der Lage, zwischen verfaultem und unbeschädigtem Holz zu unterscheiden. Gerade bei Bauteilen, die von außen betrachtet gesund aussahen, hat das Bohrwiderstandsverfahren geschädigte Bereiche im Innern exakt abgebildet. Diese Verfahrenskombination würde sich demzufolge eignen, bei intakter Fassade den Zustand des verdeckten Fachwerks zu ermitteln (vgl. 4.4).

Das Radarverfahren ermöglicht auch eine Untersuchung von Bauteilen, die von hinterlüfteten Hohlräumen durchzogen sind, beispielsweise bei der vorgehängten Fassade vom Schloss auf der Pfaueninsel. Dies ist mit Ultraschall häufig nicht möglich, da es bei jedem Lufteinschluss zu einer Totalreflektion kommt und dahinterliegende Bereiche bei der Messung von einer Seite aus nicht mehr überprüft werden können.



## 5.3 Anwendungsbereiche in der Praxis und Grenzen des Verfahrens

Praktische Anwendung findet das luftgekoppelte Ultraschall-Prüfverfahren in zwei Bereichen:

- Das Verfahren kann für die zerstörungsfreie Prüfung im Bestand, zum Beispiel von Fachwerk, Holzbalkendecke, Dachstuhl und Brettschichtholzträgern, genutzt werden. Durch die Prüfung ist ein frühzeitiges Erkennen von Fehlstellen im Holz möglich, bevor es zu einem Versagen des Bauteils kommt. So können Schäden rechtzeitig eingegrenzt und eine erste Kosten- und Aufwandsabschätzung vorgenommen werden. Relevante Schäden, die es zu detektieren gilt, sind Fäule, holzerstörender Insektenbefall und Risse. Neben der Zustandseinschätzung kann das Verfahren in Reflektion auch dazu genutzt werden, die Abmessung eines Bauteils zu bestimmen. Die Umrechnung der Schalllaufzeit im Holz auf die Bauteildicke ermöglicht die Bestimmung von Fräsungen, Ausklinkungen und Minderdicken.
- Ein anderes Anwendungsgebiet ist die Holzwerkstoffindustrie. Der Herstellungsprozess von Holzwerkstoffplatten muss laufend kontrolliert und die Fertigungsparameter müssen angepasst werden. Die Ultraschall- und Radarverfahren führen bei den meisten Plattenwerkstoffen zu zuverlässigen Ergebnissen, die nicht durch andere Messmethoden überprüft werden müssen. Durch die Detektion von Fehlstellen, beispielsweise Delaminationen und Spalter, in Echtzeit kann auf Produktionsfehler direkt reagiert werden, sodass der Ausschuss von fehlerhaften Platten reduziert werden kann. Diese Aufgabe kann mit Hilfe von leistungsstarken Luftultraschallsensoren erfolgen, die die Platten in Portalbauweise durchschallen und fehlerhafte Bereiche direkt an den Maschinenführer melden. Dieser kann dann beispielsweise durch Änderung der Klebstoffmenge auf die Meldung reagieren, um fehlerhafte Platten mit Defekten zu vermeiden. Sollte es jedoch bereits zur Produktion fehlerhafter Platten gekommen sein, werden fehlerhafte Bereiche entweder herausgeschnitten, oder es wird die gesamte Platte entsorgt. Aufwand und finanzieller Verlust sind in beiden Fällen, im Vergleich mit einer Reparatur, gering. Anders verhält es sich hingegen bei großen Bauteilen. Hier geht es um eine punktgenaue Ortung der Fehlstelle, um den Eingriff zur Bereinigung so gering wie möglich zu halten und einen Austausch des gesamten Bauteils zu vermeiden. Das Ultraschall- und Radarverfahren kann dazu genutzt werden, potenzielle Fehlstellen grob einzugrenzen bzw. gesunde Bereiche zu kennzeichnen. Verdachtsfälle können dann mit einem Punktmessverfahren beispielsweise mit der teilzerstörenden Bohrwiderstandsmessung verifiziert werden.

Das luftgekoppelte Ultraschall-Prüfverfahren hat seine Grenzen in folgenden Bereichen:

Materialuntersuchungen mit Ultraschall können nur bis zu einer gewissen Tiefe im Bauteil erfolgen. In Durchschallung liegt diese Grenze bei ca. 300 mm. In Reflektion ist die Eindringtiefe nur noch ein Siebtel so groß. Bis jetzt ist das Verfahren in Reflektion deshalb auf Holzplatten von ca. 40 mm beschränkt und kann nur unter besonderen Bedingungen an größeren Bauteilen angewendet werden. Für den Einsatz in der Holzwerkstoffindustrie ist diese Eindringtiefe für die meisten Platten ausreichend.

In Bestandsbauten sind diese Eindringtiefen meist nicht ausreichend, sodass hier nur das Messverfahren in Durchschallung in Frage kommt. In Durchschallung wird ein Zugang zum Bauteil von zwei Seiten benötigt. Gleichwohl können Schäden an Bestandsbauten, die sich nahe der Oberfläche befinden, auch in Reflektion untersucht werden. Da dieser Bereich den größten Einfluss auf die Festigkeit des gesamten Bauteils hat – hier greifen die größten Kräfte an – ist es durchaus eine Option, hier ZfP in Reflektion einzusetzen.

Hat man jedoch großflächige Delaminationen direkt unter der Oberfläche, können diese zwar durch eine ZfP in Reflektion geortet und dargestellt werden, darunter befindliche Bereiche aber nicht mehr. Bereiche, die durch oberflächennahe Risse nicht weiter durchschallt werden können, eignen sich für die Methode der Bohrwiderstandsmessung. Versuche haben ergeben, dass die Verfahrenskombination von Luftultraschall und Bohrwiderstand sehr genaue Ergebnisse liefert und auch vom Zeitaufwand im Vergleich zu anderen Prüftechniken konkurrenzfähig ist. Das gleiche gilt für Bauteile mit sehr rauer Oberfläche, beispielsweise Baumrinde oder starker Würfelbruch, verursacht durch holzerstörende Pilze, die das Ankoppeln der Ultraschallwellen an das Bauteil behindern. Auch in diesem Fall sind Bohrwiderstandsmessung das Mittel der Wahl.

Auch die Messergebnisse der Radartechnik sind kritisch zu interpretieren. Hier führt ein hoher Feuchtegehalt im Holz zu widersprüchlichen Ergebnissen, da Wasser die Mikrowellen stark absorbiert. So kann es passieren, dass das Radargramm eines durch Feuchte geschädigten Holzes ähnlich aussieht wie unbeschädigtes Holz, wenn dieses eine höhere Dichte als ein Referenzprobekörper hat.

## 5.4 Vorschläge für Verbesserungen und zukünftige Forschungsschwerpunkte

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, können die entwickelten Verfahren bereits in einigen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Dennoch besteht weiterer Verbesserungsbedarf in der Entwicklung und Anwendung des Verfahrens.

Konstruktionsbedingt besteht zwischen Sender und Empfänger ein Abstand von ca. 80 mm. Optimal wäre hingegen ein geringerer Wandler-Abstand. Da die Wandler jedoch einen Durchmesser von ca. 30 mm besitzen und durch die notwendige Schallabschirmung nicht beliebig nah zusammengeschoben werden können, hat diese Versuchsanordnung negative Auswirkungen auf das Messergebnis:

- Der Abstand der Prüfköpfe führt dazu, dass die Wandler nicht denselben Punkt auf der Oberfläche fokussieren. Zwar würde ein zusätzliches Schrägstellen der Wandler zueinander hier Abhilfe schaffen, doch ist es für ein gutes Messergebnis erforderlich, dass der Schallimpuls nahezu senkrecht auf die Oberfläche trifft. Ansonsten kommt es zu einer stärkeren Reflektion an der Bauteiloberseite und zur Entstehung von Oberflächenwellen, die das Messergebnis stören.
- Zusätzlich entsteht durch den Abstand der Prüfköpfe knapp unter der Bauteiloberfläche eine tote Zone, in der keine Fehlstellen geortet werden können, da aufgrund der Prüfkopfbeschaffenheit die seitlich in das Bauteil laufenden Ultraschallwellen eine geringe Intensität haben. Treffen diese Wellen dann auf eine Fehlstelle, die häufig auch noch parallel zur Oberfläche verläuft, reicht die schwache Reflektion nicht aus, um aus den Empfangssignalen eine Fehlstelle zu rekonstruieren. Die Entwicklung kleinerer Prüfköpfe und einer Schallabschirmung mit geringerem Rollendurchmesser könnte die tote Zone verringern und auch oberflächennahe Fehlstellen detektierbar machen. Der Nachteil kleinerer Prüfköpfe ist aber eine schlechtere Prüfkopf-Beschaffenheit, da das Schallbündel nicht mehr so stark gerichtet wird. Ein kleinerer Rollendurchmesser der Schallabschirmung führt zu einem schlechteren Abrollen auf der Oberfläche. Außerdem verringert sich die Schaumstoffdicke, wodurch Höhenunterschiede und eine raue Oberfläche schlechter ausgeglichen werden können.
- Eine weitere Herausforderung, die durch den Abstand der Prüfköpfe verursacht wird, ist die schräge Hauptschallrichtung im Bauteil. Trifft ein Schallimpuls auf die Oberfläche, wird er zur Mitte hin gebrochen und durchläuft das Bauteil von nun an schräg. Ebenso durchläuft das reflektierte Signal das Bauteil in umgekehrter Reihenfolge. Durch den verlängerten Schallweg wird das Signal zusätzlich gedämpft und kann demzufolge vom Empfänger schlechter registriert werden.

Durch den Einsatz mehrerer Prüfköpfe an einer Achse könnte die Messdauer gerade für große Probekörper deutlich reduziert werden. Bis jetzt befinden sich an dem Scanner jeweils ein Sender und ein Empfänger. Werden beispielsweise nun zehn Prüfkopfpaare in Reihe geschaltet, kann man die Messdauer auf ein Zehntel reduzieren. In der Holzwerkstoffindustrie wird diese Anordnung bereits mit piezokeramischen Prüfköpfen an Plattenwerkstoffen angewandt, da bei hoher Produktionsgeschwindigkeit die Messung mit einem Prüfkopfpaar nicht schnell genug ablaufen würde. Des Weiteren müssten die Prüfköpfe auch nicht mehr beweglich sein, sondern könnten fest über der durchlaufenden Platte befestigt werden.

Insbesondere für einen Einsatz in der Holzwerkstoff-Industrie sollten die Prüfköpfe robust sein. Im Herstellungsprozess werden unter Umständen Temperaturen von ca. 100° C. erreicht. Außerdem ist die Umgebungsluft sehr staubig, und während des Ausdampfens können Partikel gegen den Wandler geschleudert werden. Die Prüfköpfe sollten deshalb so konstruiert sein, dass Verklebungen und das Polypropylen auch hohen Temperaturen standhalten und der Wandler vor Staub und Partikeln effektiv geschützt wird. Denkbar wäre ein engmaschiges Gitter, das über den Wandler gelegt wird. Versuche haben ergeben, dass ein solches Gitter keine großen Auswirkungen auf das Messergebnis hat.

Für ein optimales Messergebnis sollten die Prüfköpfe breitbandig sein und nicht nur einen einzigen Frequenzbereich abdecken. Mit zunehmender Breitbandigkeit sinkt aber auch die Schallintensität. Deshalb muss zwischen diesen beiden Eigenschaften abgewogen und ein Kompromiss für den jeweiligen Anwendungsfall gefunden werden.

Voruntersuchungen zur Entwicklung eines mobilen luftgekoppelten Ultraschall-Messgerätes haben ergeben, dass Messungen damit prinzipiell möglich sind. Das Verfahren eignet sich dazu, dünne Holzwerkstoffe von einer Seite aus auf Fehlstellen zu überprüfen. Durch weitere Forschung in der Prüfkopftechnik könnte versucht werden, die Breitbandigkeit bei gleichbleibender Schallintensität zu erhöhen. Das Hochspannungsvormodul liefert in dieser Hinsicht schon verbesserte Prüfergebnisse und ermöglicht das Durchschallen von dickeren Werkstoffen.

Um das Messgerät aber für die Praxis vorzubereiten, ist weitere Forschungsarbeit von Nöten. Bis jetzt lief die Ansteuerung der Ultraschallwandler und die Speicherung der Messdaten über das Scannersystem „USPC 4000 AirTech“. Um das Gerät mobil betreiben zu können und ein Übertragungskabel überflüssig zu machen, müsste ein Rechner im Handmessgerät integriert werden, der diese Aufgaben übernimmt. Eine Standard-USB Schnittstelle zur Steuerung und Stromversorgung der Wandler ist zu empfehlen. Über diese Schnittstelle könnten im Anschluss einer Messung die Daten ausgelesen werden, um sie an einem externen Rechner auszuwerten. Denkbar ist zudem eine direkte Auswertung über ein integriertes Display.

Für zukünftige Forschungsprojekte ist auch eine Verfahrenskombination und eine Fusion der Messdaten von hochfrequentem Radar und Luftultraschall von Interesse. Gerade auch im Hinblick auf die vollautomatisierte Herstellung, Industrie 4.0 und künstliche Intelligenz ist eine Verfahrenskombination und eine Datenfusion sinnvoll. Die Kombination der Verfahren

könnte dazu genutzt werden, verschiedene Informationen zu einem Bauteil gleichzeitig zu gewinnen. Beispielsweise könnten mit dem Radarverfahren die Feuchteverteilung und eventuelle Metallteile im Holzbauteil erkannt werden. Das Ultraschallverfahren vervollständigt die Messung mit Informationen zu Größe und Lage der Fehlstellen. Der Maschinenführer muss die Ergebnisse diverser Messdaten dann nicht mehr interpretieren, sondern nur noch das Gesamtergebn kontrollieren. In diesem Bereich müsste zukünftig weitere Forschungsarbeit geleistet werden, damit diese Technologie Einsatz in der Holzverarbeitenden Industrie findet.

## 6. Referenzen

- Al Hagrey, S. 2006. Electrical resistivity imaging of tree trunks. *Near Surf Geophys* 4 (12):179-187.
- Algernon, D., Feistkorn, S., and Scherrer, M. 2016. Zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen mit dem Impact-Echo-Verfahren. In *Fachtagung Bauwerksdiagnose*. Berlin: DGZfP.
- Arriaga, F., Llana, D. F., Esteban, M., and Iniguez-Gonzalez, G. 2017. Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber. *Holzforschung* 71 (9):713-723.
- Bauer, S., Gerhard-Multhaupt, R., and Sessler, G. M. 2004. Ferroelectrets: Soft Electroactive Foams for Transducers. *Physics Today* 57 (2):37-43.
- Bekhta, P., Niemz, P., and Kucera, L. J. 2002. Untersuchungen einiger Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung in Holzwerkstoffen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60:41-45.
- Blomme, E., Bulcaen, D., Cool, T., Declercq, F., and Lust, P. 2010. Air-coupled ultrasonic assessment of wood veneer. *Physics Procedia* 3 (1):193-200.
- Bovtun, V. 2007. Air-coupled ultrasonic transducers based on cellular polypropylene ferroelectret films. *Ferroelectrics* 353 (1):186-192.
- Bovtun, V., Döring, J., Bartusch, J., Beck, U., Erhard, A., and Yakymenko, Y. 2007. Ferroelectret non-contact ultrasonic transducers. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* 88 (4):737-743.
- Buckley, J. 2000. Air-coupled Ultrasound - A Millennial Review. In *15th World Conference on NDT Rome: Associazione Italiana Prove non Distruttive*.
- Bucur, V. 2003. *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. edited by T. E. Timell. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- . 2005. *Acoustics of Wood*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- . 2011. *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. 1 ed. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer Netherlands.
- Burmester, A. 1965. Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen und mechanischen Eigenschaften von Holz. *Holz Roh-Werkst.* 23:227-236.
- . 1968. Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Rohdichte, Querzug- sowie Biegefestigkeit von Spanplatten. *Holz Roh-Werkst.* 26:113-117.
- Chapagain, K. R., Bjerke, W., Wagle, S., and Melandsø, T. 2018. Fast and real-time inspection of concrete structures using a rolling 3D ultrasound scanner. In *12th ECNDT*. Gothenburg, Sweden: ECNDT.
- Chimenti, D. E. 2014. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization. *Ultrasonics* 54 (7):1804–1816.
- Colling, F. 1990. Tragfähigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von den Festigkeitsrelevanten Einflussgrößen, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- Dackermann, U., Li, J., Tannert, T., Crews, K., Riggio, M., Kasal, B., and Rinn, F. 2014. In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Mater Struct* 47:787–803.
- Dackermann, U., Yu, Y., Li, J., Niederleithinger, E., and Wiggenhauser, H. 2015. A new non-destructive testing system based on narrow-band frequency excitation for the condition assessment of pole structures using frequency response functions and principle component analysis. In *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Berlin, Germany: BAM.
- Daschewski, M., Kreuzbruck, M., Prager, J., Dohse, E., Gaal, M., and Harrer, A. 2015. Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall. *Technisches Messen* 82 (3):156-166.
- Demming, M., Solbrig, K., Frühwald, K., and Hilger, T. 2013. Grundlegende Untersuchung zur Anwendung der Millimeterwellen- und Terahertz Technologie an Holz und Holzwerkstoffen. In *DGZfP-Jahrestagung*.
- Deutsch, V., Platte, M., and Vogt, M. 1997. *Ultraschallprüfung – Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Dill-Langer, G., Aicher, S., and Bernauer, W. 2005. Reflection measurements at timber glue-lines by means of ultrasound shear waves. *Otto-Graf-Journal* 16:273-284.

- Döring, D. 2011. Luftgekoppelter Ultraschall und geführte Wellen für die Anwendung in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, Universität Stuttgart, München.
- Döring, J., Bovtun, V., Bartusch, J., Erhard, A., Kreutzbruck, M., and Yakymenko, Y. 2010. Nonlinear electromechanical response of the ferroelectret ultrasonic transducers. *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 100 (2):479-485.
- Döring, J., Bovtun, V., Gaal, M., Bartusch, J., Erhard, A., Kreutzbruck, M., and Yakymenko, Y. 2012. Piezoelectric and electrostrictive effects in ferroelectret ultrasonic transducers. *J. Appl. Phys.* 112 (8).
- Dunky, M., and Niemz, P. 2013. *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren*. Vol. 2. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Fang, Y., Lin, L., Feng, H., Lu, Z., and Emms, G. W. 2017. Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products. *Comput. Electron. Agric.* 137:79-87.
- Feio, A. O., Lourenço, P. B., and Machado, J. S. 2007. Non-Destructive Evaluation of the Mechanical Behavior of Chestnut Wood in Tension and Compression Parallel to Grain. *International Journal of Agricultural Heritage*:1-47.
- Fengel, D., and Wegener, G. 1983. *Wood Chemistry, Ultrastucture, Reactions*. Berlin, New York: De Gruyter.
- Fernando Tallavo, G. C., Mahesh D. Pandey. 2012. A novel methodology for condition assessment of wood poles using ultrasonic testing. *NDT & E International* 52:149-156.
- Fujii, Y., Fujiwara, Y., Yanase, Y., Mori, T., Yoshimura, T., Nakajima, M., Tsusumi, H., Mori, M., and Kurisaki, H. 2013. Development of radar apparatus for scanning of wooden-wall to evaluate inner structure and bio-degradation non-destructively. *Advanced Materials Research* 778:289-294.
- Gaal, M., Bartusch, J., Dohse, E., Schadow, F., and Köppe, E. 2016a. Focusing of Ferroelectret Air-Coupled Ultrasound Transducers. In *AIP Conference Proceedings*: American Institute of Physics.
- Gaal, M., Bovtun, V., Stark, W., Erhard, A., Yakymenko, Y., and Kreutzbruck, M. 2016b. Viscoelastic properties of cellular polypropylene ferroelectrets. *J. Appl. Phys.* 119 (12).
- Gaal, M., Caldeira, R., Bartusch, J., and Kupnik, M. 2017. Air-Coupled Ultrasonic Ferroelectret Receiver with Additional DC Voltage. In *31. Eurosensors 2017 Conference*. Paris: MDPI.
- Gaal, M., Caldeira, R., Bartusch, J., Schadow, F., Vössing, K., and Kupnik, M. 2019. Air-coupled ultrasonic ferroelectret receiver with additional bias voltage. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 66 (10):1600-1605.
- Gaal, M., Döring, J., Bartusch, J., Lange, T., Hillger, W., Brekow, G., and Kreutzbruck, M. 2012. Ferroelektret-Prüfköpfe für berührungslose Ultraschallprüfung von faserverstärkten Kunststoffen. In *DACH-Jahrestagung*. Graz, Austria: DGZfP.
- Görlacher, R., and Hättrich, R. 1990. Die Bohrwiderstandsmessung. *Bauen mit Holz* 6:455-459.
- Gräfe, B. 2008. Luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren für Betonbauteile, Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt, Technischen Universität Berlin, Berlin.
- Guddanti, S., and Chang, S. J. 1998. Replicating sawmill sawing with TOPSAW using CT images of a full-length hardwood log. *Forest Prod J* 48 (1):72-75.
- Hans, G., Redman, D., Leblon, B., Nader, J., and La Rocque, A. 2015. Determination of log moisture content using ground penetrating radar (GPR). Part 1. Partial least squares (PLS) method. *Holzforschung* 69 (9):1117-1123.
- Hasenstab, A. 2006. Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren, Bundesanstalt für Materialprüfung und -prüfung, Technische Universität Berlin, Dissertation, Berlin.
- Hasenstab, A., Homburg, S., Maierhofer, C., and Arndt, R. 2007. Holzkonstruktionen mit Radar und Thermografie zerstörungsfrei untersuchen. In *DGZfP-Jahrestagung*: DGZfP.
- Hasenstab, A., and Redmer, B. 2016. Radiografie im Bauwesen und Kombination anderer ZfP-Verfahren. In *Fachtagung Bauwerksdiagnose*, edited by DGZfP.
- Herschel, R., Nowok, S., and Warok, P. 2015. MIMO system for fast imaging at 90 GHz. In *Microwave Conference (EuMC)*. Paris, France: IEEE.

- Hilbers, U., Neuenschwander, J., Hasener, J., Sanabria, S. J., Niemz, P., and Thoemen, H. 2012a. Observation of interference effects in air-coupled ultrasonic inspection of wood-based panels. *Wood Sci Technol* 46:979-990.
- Hilbers, U., Thoemen, H., Hasener, J., and Frühwald, A. 2012b. Effects of panel density and particle type on the ultrasonic transmission through wood-based panels. *Wood Sci. Technol.* 46 (4):685–698.
- Hillenbrand, J. 2014. DC-biased piezoelectret film transducers for airborne ultrasound. *Ferroelectrics* 472 (1):77-89.
- Hillenbrand, J., Kodejska, M., Garcin, Y., Seggern, H. V., and Sessler, G. M. 2010. High-sensitivity Piezoelectret-film Accelerometers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 17 (4):1021-1027.
- Hillenbrand, J., and Sessler, G. M. 2004. High-sensitivity piezoelectric microphones based on stacked cellular polymer films (L). *The Journal of the Acoustical Society of America* 116 (6):3267-3270.
- . 2008. DC-biased ferroelectrets with large piezoelectric  $d_{33}$  -coefficients. *Journal of Applied Physics* 103 (7).
- Hillger, W., Bühling, L., and Ilse, D. 2004. USPC 4000 AirTech – ein neues, bildgebendes Ultraschallprüfsystem für Ankopplung über Luft. In *DACH – Jahrestagung*. Salzburg: DGZfP.
- Hillger, W., Oster, R., Schuller, J., Stößel, R., Lang, S., Bosse, J., Thaler, B., Ilse, D., and Bühling, L. 2012. Automated Air-Coupled Ultrasonic Technique for the Inspection of the EC145 Tail Boom. In *4th International Symposium on NDT in Aerospace*. Augsburg, Germany: DGZfP.
- Hughes, M. 2015. Wood Composites. In *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, edited by M. P. Ansell. Amsterdam: Elsevier Science & Technology, 69-89.
- Kasal, B., and Tannert, T. 2011. *In Situ Assessment of Structural Timber*. Vol. 7. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Kempe, K. 2009. *Holzschädlinge Vermeiden, Erkennen, Bekämpfen*. Vol. 4. Berlin: Fraunhofer IRB Verlag.
- Kind, T. 2015. Signatur der Streuung von Radarwellen durch die Heterogenität von Beton, Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III, Universität des Saarlandes, Berlin.
- Kloiber, M., Reinprecht, L., Hrivnak, J., and Tippner, J. 2016. Comparative evaluation of acoustic techniques for detection of damages in historical wood. *J Cult Herit* 20:622-631.
- Knigge, W., and Schulz, H. 1966. *Grundriß der Forstbenutzung*. Hamburg, Berlin: Parey.
- Kolkoori, S., Wrobel, N., Zscherpel, U., and Ewert, U. 2015. A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials. *NDT&E International* 70:41-52.
- Kollmann, F. 1951. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Vol. 2. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer.
- Krause, M., Dackermann, U., and Li, J. 2015. Elastic wave modes for the assessment of structural timber: ultrasonic echo for building elements and guided waves for pole and pile structures. *Civil Structure Health Monitoring* 5:221-249.
- Krause, M., Mayer, K., Ballier, G., Borchardt, K., Chinta, P., Effner, U., Milmann, B., Müller, S., and Nowak, T. 2014. Hochgenaue Strukturerkennung von Holzbauteilen mit 3D-Ultraschall. In *Bauforschung für die Praxis*. Stuttgart: Forschungsinitiative Zukunft Bau, 105.
- Krause, M., Wollbold, F., Müller, W., Neisecke, J., Hillger, W., Kapphahn, G., Kroggel, O., Roye, W., and Schickert, M. 1999. Merkblatt für Ultraschall-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile (B4) Berlin: DGZfP.
- Krautkrämer, J., and Krautkrämer, H. 1986. *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Vol. 5. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer.
- Kunkle, J., Vun, R. Y., Eischeild, T., Langron, M., Bhardwaj, N., and Bhardwaj, M. 2006. Phenomenal advancements in transducers and piezoelectric composites for non-contact ultrasound and other applications. In *9th European Conference on NDT*. Berlin, Germany: ECNDT.
- Lee, S., Lee, S. J., Lee, J. S., Kim, K. B., Lee, J. J., and Yeo, H. 2011. Basic study on nondestructive evaluation of artificial deterioration of a wooden rafter by ultrasonic measurement. *J Wood Sci* 57 (5):387-394.



- Lerch, R., Sessler, G., and Wolf, D. 2009. *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Lißner, K., and Rug, W. 2018. *Holzbausanierung beim Bauen im Bestand*. Vol. 2. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Lossau, N. 2019. Warum das Bauen mit Holz viele Vorteile bringt. *Welt*. <https://www.welt.de/wissenschaft/plus198595535/Neubauten-aus-Holz-und-Lehm-liegen-im-Trend>.
- Lualdi, M., Zanzi, L., and Binda, L. 2003. Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations. In *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Berlin: DGZfP.
- Macchioni, N., Mannucci, M., Olmi, R., Palanti, S., and Riminesi, C. 2013. Microwave reflectometric tool for non-destructive assessment of decay on timber structures. *Adv Mater Res-Switz* 778:281-288.
- Mai, T. C., Sbartai, Z. M., Bos, F., Razafindratsima, S., and Demontoux, F. 2014. Non Destructive Evaluation of Timber Structures Using GPR technique. *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar* 15:218-222.
- Maia, O. M. D., Schneider, F. K., Maia, J. M., Neves, L. C., and Penteado, S. D. C. 2014. Wood characterization using the power spectral density and phase velocity of ultrasonic signals. *2014 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*:1416-1419.
- Marhenke, T., Neuenschwander, J., Furrer, R., Twiefel, J., Hasener, J., Niemz, P., and Sanabria, S. J. 2018. Modeling of delamination detection utilizing air-coupled ultrasound in wood-based composites. *NDT and E Int.* 99:1-12.
- Martin, T. 2009. Anwendung des komplexen elektrischen Widerstandsverfahrens an Eichen, Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften, Technische Universität Clausthal, Berlin.
- . 2010. Complex resistivity measurements on oak. *Eur J Wood Wood Prod* 70:45-53.
- Martínez-Sala, R., Rodríguez-Abad, I., Barra, R. D., and Capuz-Lladro, R. 2013. Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique. *Constr Build Mater* 38:903-911.
- Mestre, P., Calcada, A., Carvalho, N., Serodio, C., Couto, P., Matias, J., Melo-Pinto, P., and Morais, J. 2013. Low-cost Ultrasonic Probe to Assess Wood Defects and Parameters. *World Congress on Engineering - Wce 2013, Vol II*:993-998.
- Mohebbi, A., Mihhri, F., Ajji, A., and Rodrigue, D. 2016. Cellular Polymer Ferroelectret: A Review on Their Development and Their Piezoelectric Properties. *Advances in Polymer Technology* 37 (2):468-483.
- Muller, W. 2003. Timber girder inspection using ground penetrating radar. In *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Berlin: DGZfP.
- Niemz, P. 1993. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag.
- Niemz, P. 2010. Zerstörungsfreie Prüfung von Holz und Holzwerkstoffen. In *Wood Physics Group*, edited by E. Zürich. Zürich: Institute for Building Materials.
- Niemz, P., and Mannes, D. 2012. Non-destructive testing of wood and wood-based materials. *J Cult Herit* 13:26-34.
- Nowak, T., Hamrol-Bielecka, K., and Jasieńko, J. 2015. Non-destructive testing of wood – correlation of ultrasonic and stress wave test results in glued laminated timber members. *Forestry and Wood Technology* 92:317-324.
- Nowak, T. P., Jasienko, J., and Hamrol-Bielecka, K. 2016. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness. *Constr Build Mater* 102:403-415.
- Nusser, E. 1936. Die Bestimmung der Holzfeuchte durch Messung des elektrischen Widerstandes. *Holz als Roh- und Werkstoff* 11 (1):417-420.
- Osterloh, K., Hasenstab, A., Zscherpel, U., Alekseychuk, O., Meinel, D., Goebbels, J., and Ewert, U. 2006. Radiographic and Tomographic Testing of Wood. In *9th European Conference on NDT*. Berlin: ECNDT, 1-10.
- Paajanen, M., Lekkala, J., and Kirjavainen, K. 2000. ElectroMechanical Film (EMFi) - a new multipurpose electret material. *Sensors Actuators, A Phys.* 84 (1):95-102.

- Pawliczek, S., Herschel, R., and Pohl, N. 2018. High precision surface reconstruction based on coherent near field synthetic aperture radar scans. In *19th International Radar Symposium (IRS)*. Bonn, Germany.
- Piirto, D. D., and Wilcox, W. W. 1978. Critical Evaluation of the Pulsed-Current Resistance Meter for Detection of Decay in Wood. *Forest Prod J* 28:52-56.
- Riggio, M., Sandak, J., and Franke, S. 2015. Application of imaging techniques for detection of defects, damage and decay in timber structures on-site. *Constr Build Mater* 101:1241-1252.
- Rinn, F. 2003. Technische Grundlagen mechanischer Impuls-Tomographie an Bäumen. *Baumzeitung* 8:29-31.
- Ross, R. J. 1992. Nondestructive testing of wood. Madison: Forest Products Laboratory, 43-47.
- Ross, R. J., and Pellerin, R. F. 1994. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures. *General Technical Report FPL-GTR-70*.
- Ross, R. J., and Pellerin, R. F. 2002. *Nondestructive Evaluation of Wood*. Madison: Forest Products Society.
- Sanabria, S. J. 2012. Air-coupled ultrasound propagation and novel non-destructive bonding quality assessment of timber composites, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, ETH, Zurich, Switzerland.
- Sanabria, S. J., Furrer, R., Neuenschwander, J., Niemz, P., and Schütz, P. 2015. Analytical modeling, finite-difference simulation and experimental validation of air-coupled ultrasound beam refraction and damping through timber laminates, with application to non-destructive testing. *Ultrasonics* 63:65-85.
- Sanabria, S. J., Furrer, R., Neuenschwander, J., Niemz, P., and Sennhauser, U. 2011a. Air-coupled ultrasound inspection of glued laminated timber. *Holzforschung* 65 (3):377-387.
- Sanabria, S. J., Furrer, R., Neuenschwander, J., Niemz, P., and Sennhauser, U. 2013. Novel slanted incidence air-coupled ultrasound method for delamination assessment in individual bonding planes of structural multi-layered glued timber laminates. *Ultrasonics* 53:1309-1324.
- Sanabria, S. J., Mueller, C., Neuenschwander, J., Niemz, P., and Sennhauser, U. 2011b. Air-coupled ultrasound as an accurate and reproducible method for bonding assessment of glued timber. *Wood Sci Technol* 45:645-659.
- Schickert, M., Bonitz, F., Ulanov, A., Müller, B., Ruminski, S. C., Reppenning, P.-E., Blüthgen, L., Flade, P., and Wiedemann, J. 2017. Tomographische Abbildung mit Ultraschall, Radar und Röntgen zur Detektion von Fäule in Holzstämmen. In *DGZfP Jahrestagung*. Koblenz, Germany.
- Schickert, M., Tümmeler, U., and Bühling, L. 2006. Rapid Scanning Approaches for Ultrasonic Imaging of Concrete. In *9th European Conference on NDT*. Berlin: ECNDT.
- Schmoldt, D. L., Nelson, R. M., Ross, R. J., and McDonald, K. A. 1997. *Ultrasonic inspection of wooden pallet parts using time of flight*. Vol. 16. Boston: Springer.
- Sessler, G. M., and Hillenbrand, J. 1999. Electromechanical response of cellular electret films. *Appl. Phys. Lett.* 75 (21):3405-3407.
- Shevaldykin, V. G., Samokrutov, A. A., and Kozlov, V. N. 2003. Ultrasonic Low-Frequency Short-Pulse Transducers with Dry Point Contact. Development and Application. In *Non-Destructive Testing in Civil Engineering International Symposium*. Berlin: DGZfP.
- Solbrig, K., Fuchs, M., Frühwald, K., and Ressel, J. B. 2014. Accuracy of the radiometric determination of raw density gradients on wood-based composites. *Holztechnologie* 55:27-34.
- . 2015. Zuverlässiger Einsatz quantitativer Röntgenmesstechnik zur Prozess- und Qualitätskontrolle in der Holzwerkstoffindustrie. In *DACH-Jahrestagung*. Salzburg, Austria: DGZfP, 1-13.
- Solodov, I., and Busse, G. 2006. New Advances in Air-Coupled Ultrasonic NDT Using Acoustic Mode Conversion. *ECNDT*.
- Solodov, I., Pfeleiderer, K., and Busse, G. 2004. Nondestructive characterization of wood by monitoring of local elastic anisotropy and dynamic nonlinearity. *Holzforschung* 58:504-510.
- Sousa, H. S., Sorensen, J. D., Kirkegaard, P. H., Branco, J. M., and Lourenco, P. B. 2013. On the use of NDT data for reliability-based assessment of existing timber structures. *Eng Struct* 56:298-311.

- Stößel, R. 2004. Air-Coupled Ultrasound Inspection as a New Non-Destructive Testing Tool for Quality Assurance, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart.
- Tanasoiu, V., Miclea, C., and Tanasoiu, C. 2002. Nondestructive testing techniques and piezoelectric ultrasonics transducers for wood and built in wooden structures. *J Optoelectron Adv M* 4 (4):949-957.
- Vössing, K., and Niederleithinger, E. 2018. Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A review. *Holzforschung* 72 (6):467–476.
- Vössing, K. J., Gaal, M., and Niederleithinger, E. 2018. Air-coupled ferroelectret ultrasonic transducers for nondestructive testing of wood-based materials. *Wood Sci. Technol.* 52 (6):1527-1538.
- Wang, X., and Allison, R. B. 2008. Decay Detection in Red Oak Trees Using a Combination of Visual Inspection, Acoustic Testing, and Resistance Microdrilling. *Arboriculture & Urban Forestry* 34:1-4.
- Wang, X., Divos, F., Pilon, C., Brashaw, B. K., Ross, R. J., and Pellerin, R. F. 2004. Assessment of Decay in Standing Timber Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools - A Guide for Use and Interpretation. In *General Technical Report* Wisconsin: United States Department of Agriculture.
- Wedvik, B., Stein, M., Stornes, J., and Mattsson, J. 2016. On-site Radioscopic Qualitative Assessment of Historic Timber Structures: Identification and Mapping of Biological Deterioration of Wood *Int J Archit Herit* 10 (5):646-662.
- Wegener, M., Bergweiler, S., Wirges, W., Pucher, A., Tuncer, E., and Gerhard-Mulhaupt, R. 2005. Piezoelectric two-layer stacks of cellular polypropylene ferroelectrets: Transducer response at audio and ultrasound frequencies. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 52 (9):1601-1605.
- Wegener, M., Wirges, W., Gerhard-Mulhaupt, R., Dansachmüller, M., Schwödiauer, R., Bauer-Gogonea, S., Bauer, S., Paajanen, M., Minkkinen, H., and J. Raukola. 2004. Controlled inflation of voids in cellular polymer ferroelectrets: Optimizing electromechanical transducer properties. *Appl. Phys. Lett.* 84 (3):392-394.
- Weihs, U., and Krummheuer, F. 1999. Zerstörungsfreie Baumdiagnose mittels elektrischer Widerstandstomographie. *Forst und Holz* 54:166-170.
- White, R. H., and Ross, R. J. 2014. Wood and Timber Condition Assessment Manual. In *General Technical Report*. Washington: United States Department of Agriculture.
- Xu, H., and Wang, L. 2014. Analysis of cold temperature effect on stress wave velocity in green wood. *Holzforschung* 68 (6):693-698.
- Yang, Z., Jiang, Z., Hse, C. Y., and Liu, R. 2017. Assessing the impact of wood decay fungi on the modulus of elasticity of slash pine (*Pinus elliottii*) by stress wave non-destructive testing. *Int Biodeterior Biodegradation* 117:123-127.
- Zhang, X., Hillenbrand, J., and Sessler, G. M. 2004. Piezoelectric d33 coefficient of cellular polypropylene subjected to expansion by pressure treatment. *Applied Physics Letters* 85 (7):1226–1228.